

JAERI-Research

99-052



JP9950599



燃料体内の反応度調整材位置を考慮した反応度
価値評価手法のVHTRC実験データによる検討

1999年9月

藤本 望・山下清信・秋濃藤義

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

燃料体内の反応度調整材位置を考慮した反応度 価値評価手法の VHTRC 実験データによる検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

藤本 望・山下 清信・秋濃 藤義[†]

(1999 年 7 月 27 日受理)

VHTRC 炉心に複数本の反応度調整材(BP)棒を装荷した実験結果について、BP 反応度価値の解析精度を評価した。その結果、HTTR の核設計に用いている、ブロック内を均質としたモデルでは BP 反応度を 20%程度過小評価することが明らかとなった。この結果は、BP 反応度を系統的に過小評価しているため、過剰反応度を高めに評価するという観点からは保守的であり安全上問題ない。しかしながら、高温ガス炉の設計の合理化、将来炉の設計、HTTR の運転管理等のためには評価精度の向上が必要である。そこで、BP 位置をモデル化し炉心内のインポータンス分布をより詳細に考慮すれば精度が向上すると考え、燃料体内での BP 棒の位置を考慮できるよう燃料体のメッシュ分割数を増やしたモデルを作成した。このモデルと共に、炉心計算の BP 棒領域に対応する範囲で均質化することにより作成した実効断面積を用いることにより、10%以下の誤差で BP 反応度を評価できることが明らかとなった。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

[†] 国際原子力総合技術センター東海研修センター

**Study of Burnable Absorber Reactivity Worth Evaluation Method
Considering the Position of Burnable Absorber Rod in a Block
using VHTRC Experimental Results**

Nozomu FUJIMOTO, Kiyonobu YAMASHITA
and Fujiyoshi AKINO[†]

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 27, 1999)

The calculation accuracy of BP reactivity worth was evaluated using the experimental data of VHTRC cores which contain plural BP rods. As a result, BP reactivity worth was evaluated with about -20% of error by a model of an HTTR nuclear design code system in which all materials in a fuel block distributed homogeneously in the block. The BP reactivity worth was evaluated less than the experimental values systematically. It was conservative calculation model from the viewpoint of excess reactivity evaluation because it evaluated the excess reactivity higher. However, more precise calculation is expected for rationalization of HTGR core design, design for future HTGRs, operation and fuel management of the HTTR. It is considered that the calculation accuracy would be improved considering the position of BP rod in a core. Therefore, new model, in which a fuel block was divided into fine mesh to model the position of BP rods in a block, was developed. The effective cross section set of BP was evaluated by a BP cell model which had the same cross section area of BP region in the core calculation. It became clear that the BP reactivity worth could be evaluated with the error less than 10% using the new model.

Keywords : HTTR, VHTRC, Burnable Absorber, Reactivity, Calculation Model, Diffusion Calculation, Cell Calculation, Effective Cross Section

[†] Tokai Education Center , Nuclear Technology and Education Center

目 次

1. はじめに	1
2. VHTRC の概要と実験結果	1
2.1 VHTRC の概要	1
2.2 複数本の BP を装荷した場合の反応度価値	2
2.2.1 測定方法	2
2.2.2 測定結果	3
3. BP 反応度価値の解析評価	20
3.1 計算コードシステムとモデル	20
3.1.1 設計計算モデル	20
3.1.2 詳細計算モデル	21
3.2 解析結果と検討	21
3.2.1 設計計算モデルによる解析結果	21
3.2.2 詳細計算モデルによる解析結果	22
3.3 HTTR 解析モデルの検討	24
4. まとめ	35
謝辞	35
参考文献	36
付録 設計計算モデル及び詳細計算モデルでの入力データ集	37

Contents

1.Introduction.....	1
2.Outline of VHTRC and Experimental Results	1
2.1 Outline of VHTRC.....	1
2.2 Experimental Results of Reactivity of Plural Burnable Absorber Rods.....	2
2.2.1 Experimental Method	2
2.2.2 Experimental Results	3
3.Evaluation of BP Reactivity	20
3.1 Calculation Code and Model.....	20
3.1.1 HTTR Design Model	20
3.1.2 Fine Mesh Model.....	21
3.2 Calculational Results and Discussion	21
3.2.1 Results from HTTR Design Model.....	21
3.2.2 Results from Fine Mesh Model	22
3.3 Discussion of HTTR Calculation Model.....	24
4.Conclusion.....	35
Acknowledgments	35
References	36
Appendix	
Input data for HTTR Design Model and Fine Mesh Model.....	37

1. はじめに

我が国初めての高温ガス炉である高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR）は原子炉出口冷却材温度 950°C 及び 660 日の燃焼期間を達成できる¹⁾。これは、適切な諸元の反応度調整材(BP)を装荷し、燃焼期間を通じて過剰反応度を適切な値に保つ設計としているためである。具体的には、HTTR では B_4C/C と黒鉛のペレットを積み重ねることにより BP 棒とし、燃料体の周辺部 3 カ所に装荷孔を設け、装荷する BP 棒の本数及び長さを調整して反応度を所定の値に制御する。

これまで拡散計算による HTTR の解析手法については、高温ガス炉臨界実験装置(VHTRC) 炉心に 1 本の BP を装荷した炉心について精度検討が行われていた²⁾。精度検討に用いられたモデルは燃料体を平面で 6 メッシュに分割し、燃料体内の物質をすべて均質化したモデルであり、HTTR の核設計に用いられた解析モデルと同様のものである。このモデルでは燃料体内の物質配置、特に BP 棒の位置をモデル化することができなかった。HTTR の設計を進めていた当時は計算機の能力が低く、このようなモデルでも HTTR 全炉心の解析に 1 時間近い計算時間を必要としていたため、より詳細なモデルを用いて解析を行うことは困難であった。

近年、計算機の能力が飛躍的に向上したため、燃料体のメッシュ分割数を増やし、燃料体内の物質の配置をモデル化することが可能となってきた。HTTR では 1 燃料体に 2 本の BP 棒を燃料体の周辺部に装荷している。このため、燃料体内の物質配置をモデル化し、炉心内のインポータンス分布による影響をより詳細に考慮すれば解析精度の向上が期待される。また、今後、高温ガス炉の炉心設計の合理化、将来型高温ガス炉の設計、HTTR での各種試験の解析及び運転監視等にはより精度の高い解析が求められている。

よって、VHTRC において、多数本の BP を装荷した炉心について実験を行い、HTTR 核特性解析コードシステムを用いて燃料体内の BP 棒の位置を考慮した解析を行い、解析精度の評価を行った。

本報では、VHTRC の実験で得られた複数本の BP を装荷した場合の実験結果と、このデータを HTTR の核特性解析コードシステムで評価した場合の結果及び解析モデルの違いによる効果について報告する。

2. VHTRC の概要と実験結果

2.1 VHTRC の概要³⁾

VHTRC は、高温ガス炉の核特性のデータを取得するため建設された臨界集合体である。減速材に黒鉛を、燃料に被覆燃料粒子を用いている。VHTRC 及び HTTR の燃料体は黒鉛ブロックの中に燃料棒が插入されたピンインブロック型式である。VHTRC の炉心は 2 つ

の 1/2 黒鉛集合体から成り、燃料体や黒鉛ブロックを平径約 2.4m、軸長約 1.2m の横置六角柱状に積層し、周囲を固定枠で固定した構造となっている。炉心黒鉛ブロックには燃料装荷用の孔及び制御・安全棒挿入用の孔が設けられており、実験目的に応じて燃料配置、装荷量等炉心の組み替えが比較的用意かつ安全に行い得るようになっている。また、1/2 集合体の一方を固定型とし、他方を移動型とし、運転を行う際には移動側集合体を架台移動機構により移動させる。第 2.1.1 図に VHTRC の概要を示す。第 2.1.2 図には VHTRC の 1/2 集合体の断面図を示す。

燃料体に挿入されている燃料棒は燃料スリーブと燃料コンパクトから構成されている。燃料コンパクトは、低濃縮（2wt%, 4wt%, 6wt%）の二酸化ウランを燃料核とした被覆燃料粒子を黒鉛マトリックス中に分散させた構造である。燃料コンパクトを燃料スリーブに挿入して燃料棒とする形式であるため、目的に応じ燃料の濃縮度配分を変化させた実験が可能である。

炉心黒鉛ブロックには、燃料棒挿入用黒鉛ブロックと実験用制御棒黒鉛ブロックとがある。燃料棒挿入用黒鉛ブロックには 18 個の燃料棒挿入孔があり、必要な量の燃料棒を挿入し、他の挿入孔は黒鉛棒が挿入される。実験用制御棒黒鉛ブロックには模擬制御棒を挿入するための孔があいており、通常は黒鉛棒が挿入されている。

第 2.1.1 表に燃料の検査実績を、第 2.1.2 表に黒鉛のデータを示す。

2.2 複数本の BP を装荷した場合の反応度価値

2.2.1 測定方法

HTTR では、燃料最高温度の低減を図るために、炉心内のウラン濃縮度配分及び BP 棒のボロン含有量の最適化を図っている。この炉心構成を模擬するため、軸方向のウラン濃縮度が 2-4-6wt% と異なる VHTRC-4 炉心において、固定側 1/2 集合体にはボロン含有量が約 1wt% の BP 棒 (W-1 型) を、移動側 1/2 集合体にはボロン含有量が約 2wt% の BP 棒 (W-2 型) を挿入した炉心を構成し実験を行った。濃縮度の分布は固定側に 2wt% 及び 4wt% の燃料を装荷し、移動側に 4wt% 及び 6wt% の燃料を装荷している。第 2.2.1 表に BP 棒に用いる中性子吸収ペレット及び黒鉛ペレットの諸元を示す。第 2.2.1 図に固定側に装荷した燃料棒と W-1 型 BP 棒の構造図を示す。第 2.2.2 図に移動側に装荷した燃料棒と W-2 型 BP 棒の構造図を示す。

BP 棒の反応度価値は、パルス中性子法 (PNS 法) により測定した。測定に用いた検出器及びパルス中性子源法の測定系のブロック線図を第 2.2.3 図に示す。BP 棒の反応度価値は、即発中性子減衰定数を測定して以下の修正 King-Simmon's 流の反応度式を用いて求めた⁴⁾。

$$\rho_{RKS} = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_c} f + \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \left(\frac{\Lambda}{\beta_{eff}} - \frac{\Lambda_c}{\beta_{effc}} \right) \alpha \\ \varepsilon_2 &= \frac{\alpha}{\beta_{eff}} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{\lambda_i - \alpha} - \frac{\alpha_c}{\beta_{effc}} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieffc}}{\lambda_i - \alpha_c} \\ f &= \frac{\alpha_c}{\beta_{effc}} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieffc}}{\alpha_c - \lambda_i}\end{aligned}$$

ρ_{RKS} : BP 棒の反応度 (\$)

α_0 : 基準体系の即発中性子減衰定数

α_c : 臨界時の即発中性子減衰定数

ここで、実効遅発中性子割合 β_{eff} 及び中性子生成時間 Λ は、各実験体系について 24 群 3 次元拡散理論により、SRAC⁵⁾で計算した値である。

VHTRC-4 炉心の最小臨界装荷燃料棒数は 282 本であった。そこで、基準体系の燃料棒装荷本数は 276 本とし、PNS ターゲットを固定側 1/2 集合体の背面中央部に配置し、即発中性子減衰曲線を炉心内に装荷した 4 本の 1/4" 直径 BF_3 検出器を用いて測定した。第 2.2.4 図に PNS ターゲットの配置及び基準体系の燃料棒装荷状態図を示す。

実験では、276 本の燃料棒を装荷した VHTRC-4 炉心を基準として行った。この炉心に BP 棒の装荷本数及び装荷パターンを変えて 5 ケースの測定を行った。第 2.2.5 図から第 2.2.9 図に、各実験体系の BP 棒の挿入パターンを示す。

ケース 1 は内側の 6 カラムについて燃料ブロック毎に 1 本の BP 棒を装荷した炉心である。ケース 2 は内側 6 カラムについて各燃料ブロックに 2 本、ケース 3 は 3 本の BP 棒を装荷した炉心である。ケース 4 は内側の 6 カラム及び外側の 6 カラムについて、核燃料ブロック毎に 1 本の BP 棒を装荷したケースである。ケース 6 は、内側カラムについては各燃料ブロック毎に 2 本、外側のカラムについては各燃料ブロック毎に 1 本の BP 棒を装荷した炉心である。

2.2.2 測定結果

4 系統の BF_3 検出器を用いて測定した即発中性子減衰データの例を第 2.2.10 図に示す。それぞれのケースについて、ALPHA-D⁶⁾コードを用いて処理し即発中性子減衰定数 α を求めた。測定結果の α は、基本モードに漸近した 4 個の α の平均値とした。例として、ALPHA-D コードで処理して得られた α と単一指数フィッティング開始チャンネルとの関係を第 2.2.11 図に示す。各体系での測定結果を第 2.2.2 表に示す。同表中では基準体系での結果をケース 0 として示している。また、SRAC による解析で得られた実効遅発中性子割合を

用いて $\Delta k/k$ 単位に換算した結果も併せて示している。

なお、VHTRC-4 炉心の臨界時の即発中性子減衰定数 α_c は、PNS 法を用いてあらかじめ測定した。その測定値として、 $\alpha_c = 5.51 \pm 0.05$ (1/sec)を得ている。

第 2.1.1 表 燃料コンパクト諸元

燃料コンパクト種類		B-2	B-4	T-6	
燃料核	²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	2.000±0.003	4.000±0.006	5.966±0.009	
	直径 (μm)	602±5	599±4	595±6	
	UO ₂ 密度 (g/cm ³)	10.42±0.11	10.35±0.08	10.26±0.05	
	不純物濃度 (ppm)	<0.3	<0.3	<0.3	
被覆層	第 1 層 (PyC)	厚さ (μm) 密度 (g/cm ³)	79±5 1.19±0.02	79±4 1.18±0.03	60±4 1.17±0.04
	第 2 層 (PyC)	厚さ (μm) 密度 (g/cm ³)	79±4 1.87±0.02	78±4 1.87±0.02	30±2 1.86±0.02
	第 3 層 (SiC)	厚さ (μm) 密度 (g/cm ³)	- -	- -	23±2 3.02~3.21
	第 4 層 (PyC)	厚さ (μm) 密度 (g/cm ³)	- -	- -	44±2 1.85±0.03
	外径 (μm)		918±14	913±10	909±14
	ウラン含有量 (g)		20.999±0.044	20.950±0.044	20.904±0.044
	外径 (mm)		35.85±0.03	35.98±0.05	35.96±0.04
	内径 (mm)		17.95±0.05	17.96±0.02	17.99±0.02
	高さ (mm)		35.98±0.06	36.01±0.06	36.00±0.05
	黒鉛マトリックス密度 (g/cm ³)		1.71±0.02	1.69±0.02	1.69±0.02
燃料コンパクト					

第 2.1.2 表 黒鉛ブロック諸元

平径 (mm)	300±0.3
長さ (mm)	1200±1
燃料棒孔の直径 (mm)	47±0.4
制御棒孔の直径 (mm)	65.5±0.4
密度 (g/cm ³)	1.665
不純物* (ppm)	0.07
灰分 (ppm)	9.4
水分含有量 (wt%)	0.011

* 不純物量は全てボロンに換算した量

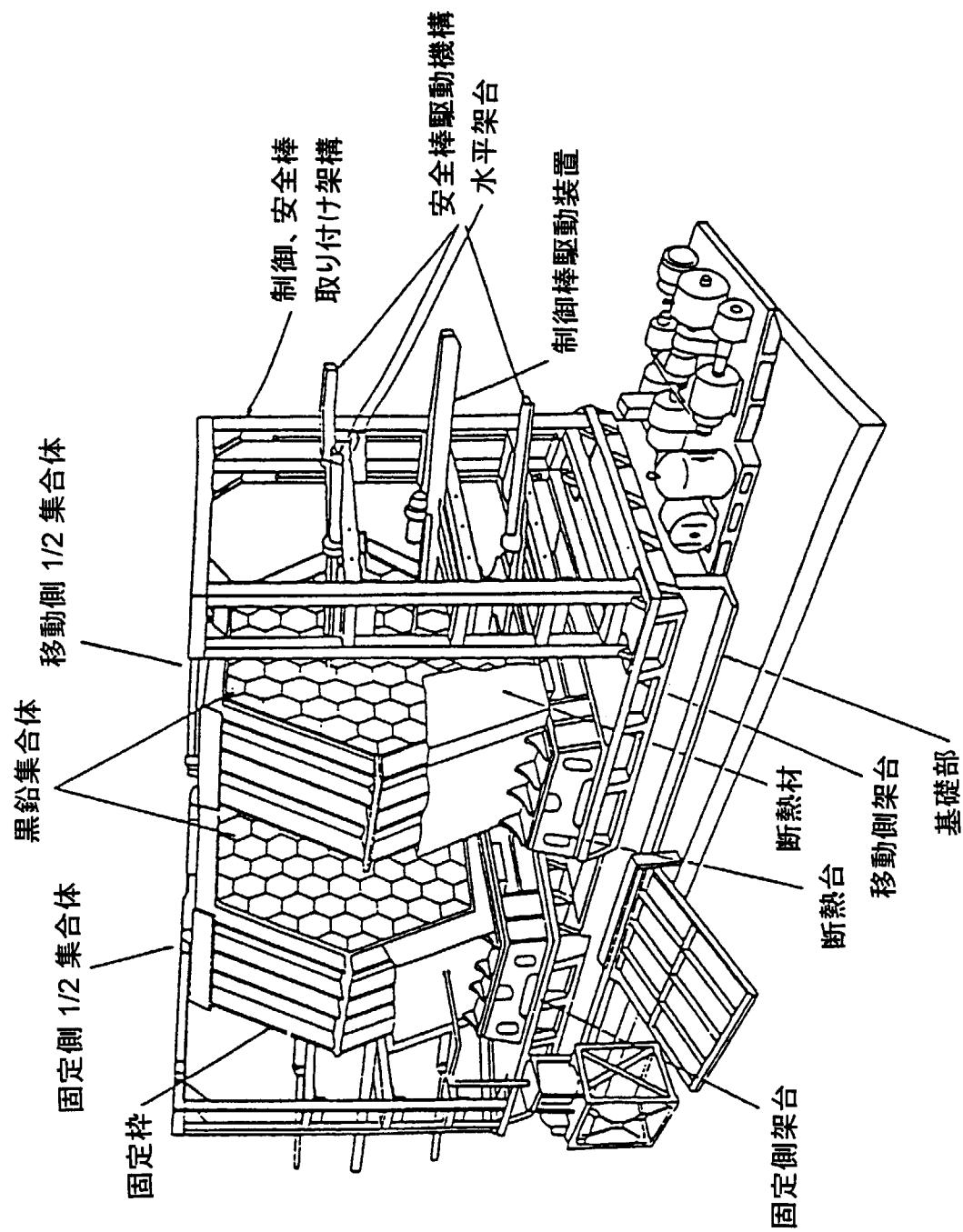
第 2.2.1 表 反応度調整材及び黒鉛ペレット諸元

ペレット種類	W-1	W-2	黒鉛ペレット
直径 (mm)	11.86	11.87	11.91
高さ (mm)	18.02	18.02	36.04
密度 (g/cm ³)	1.73	1.73	1.67
天然ボロン含有量 (wt%)	0.97	1.87	—

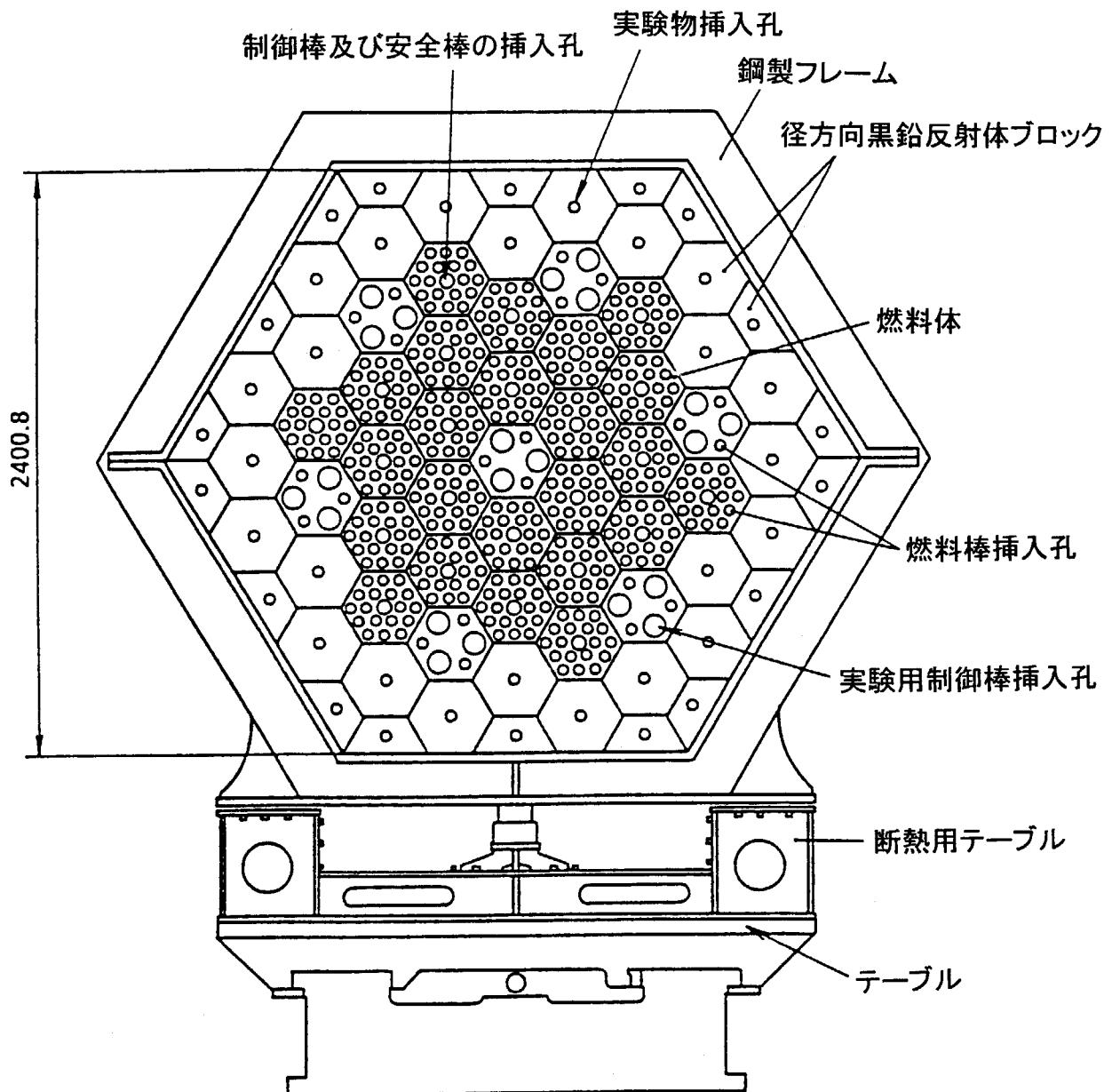
第 2.2.2 表 複数本の BP を装荷した炉心の実験結果

ケース 番号	BP 配置		BP 本数	α (1/sec)	BP 反応度 ρ_{RKS} (\$)	BP 反応度* (%Δk/k)
	内側カラム	外側カラム				
0	0	0	0	7.09 ± 0.07 (α_0)	-	-
1	1×6 カラム	0	12	51.76 ± 0.16	9.67 ± 0.11	7.06
2	2×6 カラム	0	24	89.24 ± 0.72	18.32 ± 0.37	13.37
3	3×6 カラム	0	36	115.7 ± 1.3	25.04 ± 0.63	18.28
4	1×6 カラム	1×6 カラム	24	73.16 ± 0.27	14.11 ± 0.21	10.30
5	2×6 カラム	1×6 カラム	36	117.4 ± 1.0	24.3 ± 0.5	17.74

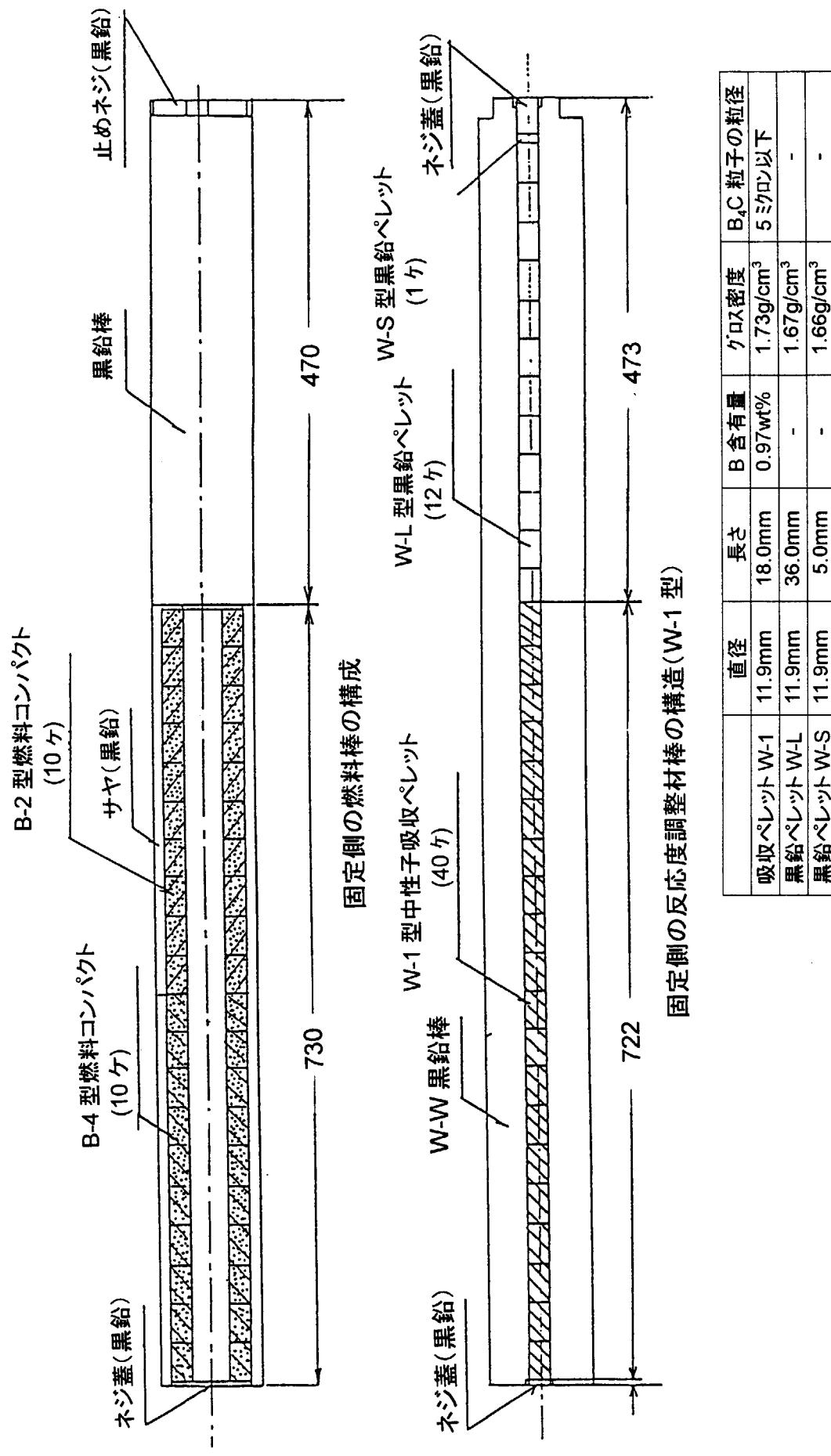
* $\beta_{\text{eff}} = 0.0072993$ を用いて換算した。



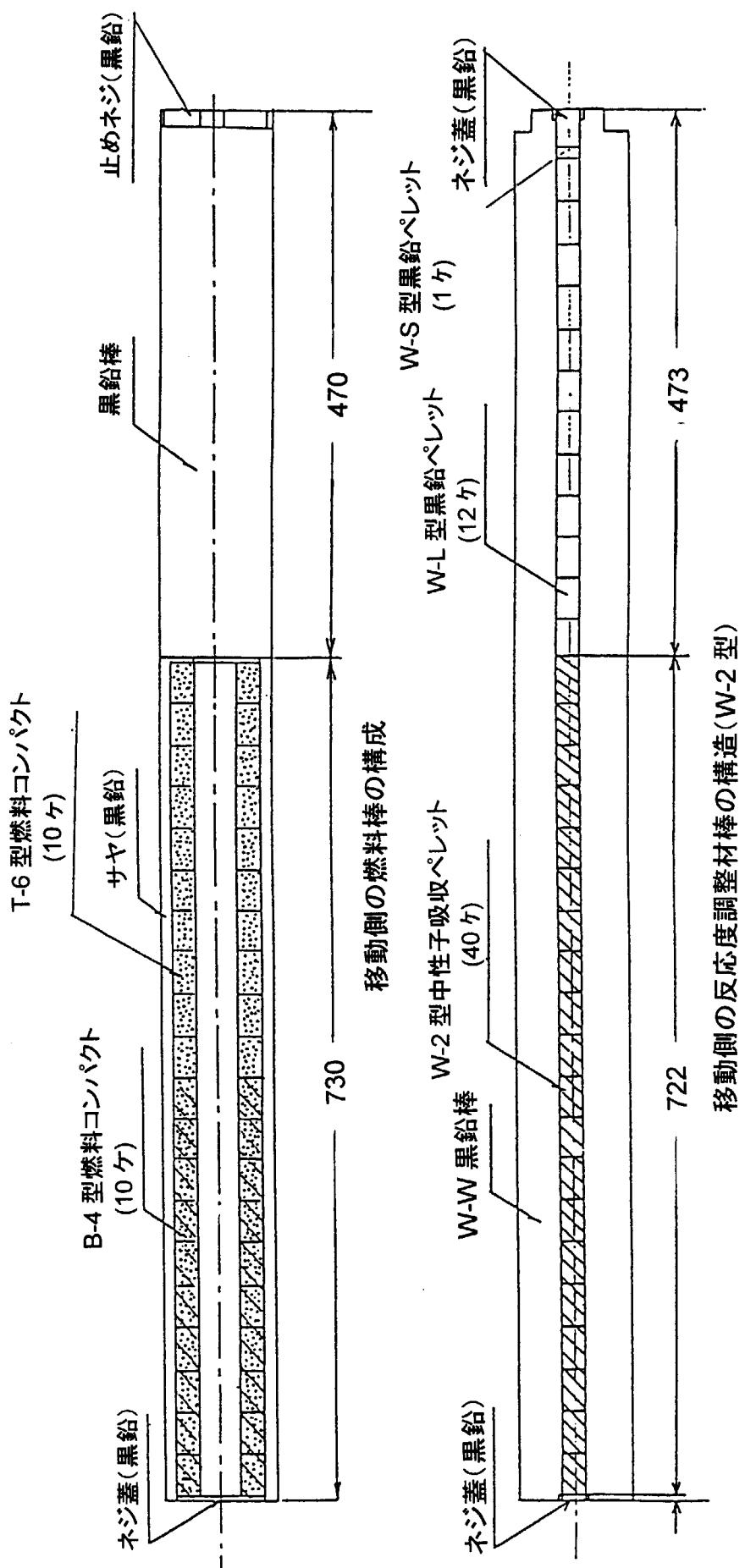
第 2.1.1 図 VHTRC の概念図



第 2.1.2 図 VHTRC の側断面図

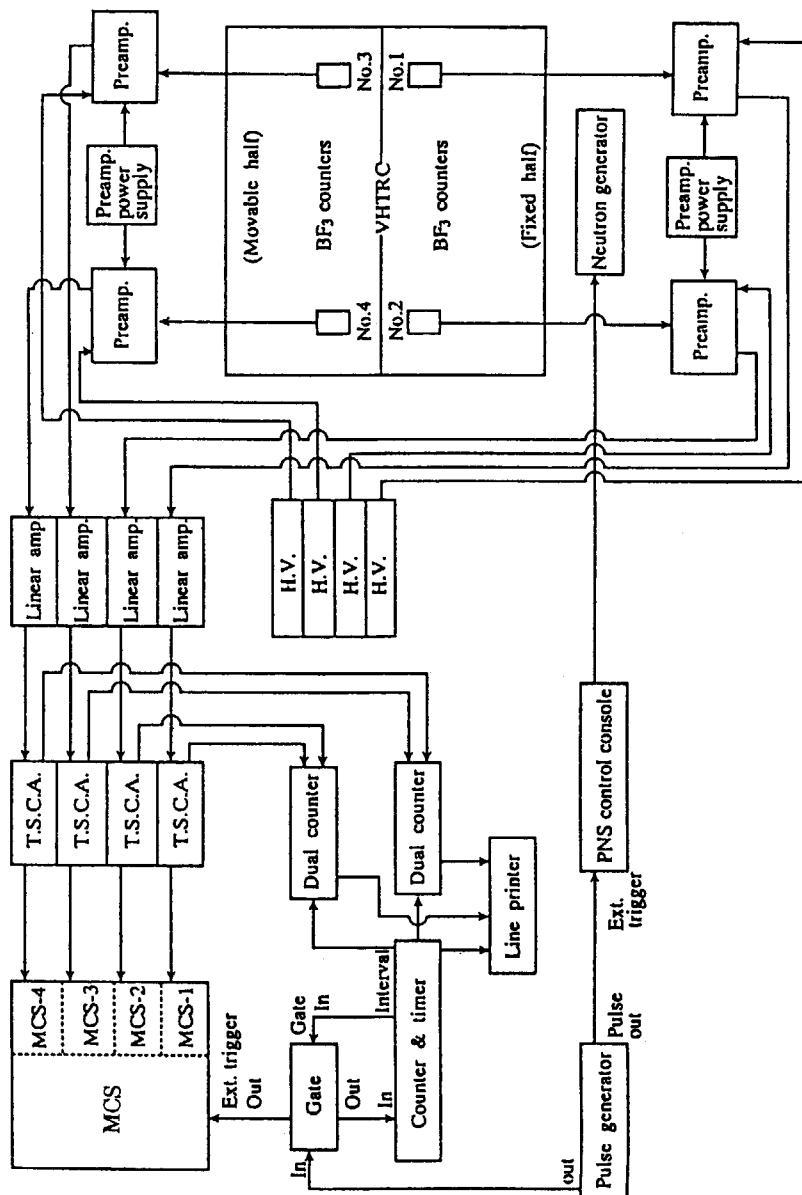


第2.2.1図 固定側の燃料棒及びBP棒の構造図

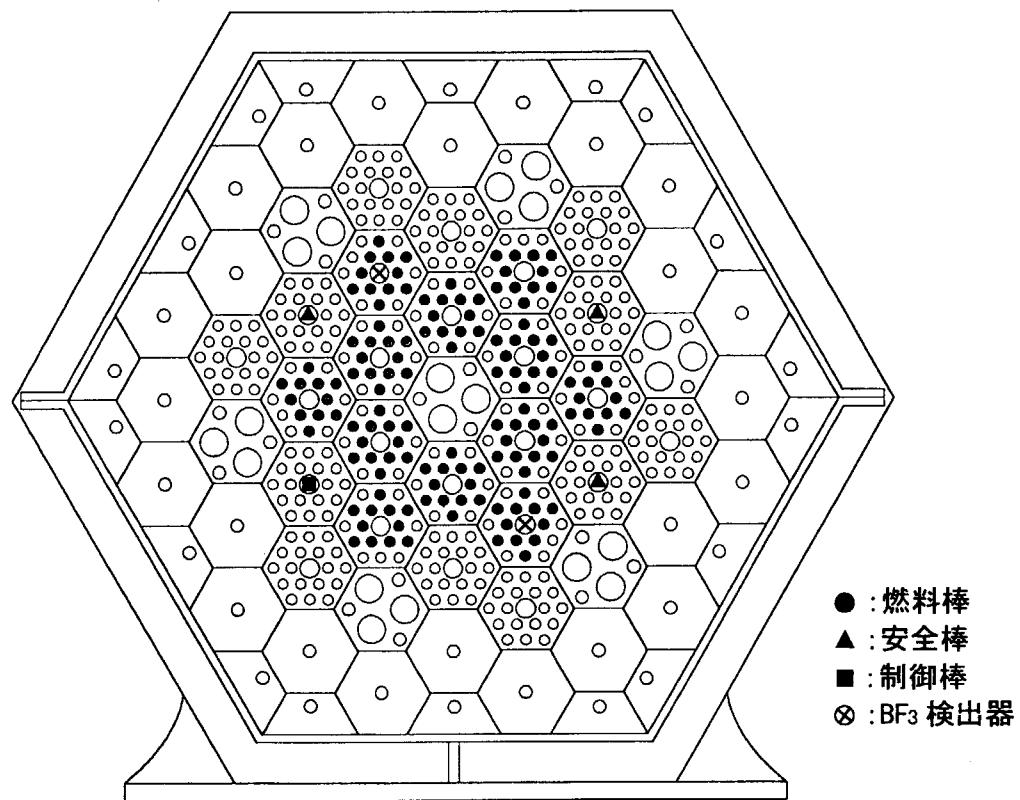


	直径	長さ	B含有量	ケロス密度	B ₄ C粒子の粒径
吸収ペレットW-2	11.9mm	18.0mm	1.9wt%	1.73g/cm ³	5ミクロン以下
黒鉛ペレットW-L	11.9mm	36.0mm	-	1.67g/cm ³	-
黒鉛ペレットW-S	11.9mm	5.0mm	-	1.66g/cm ³	-

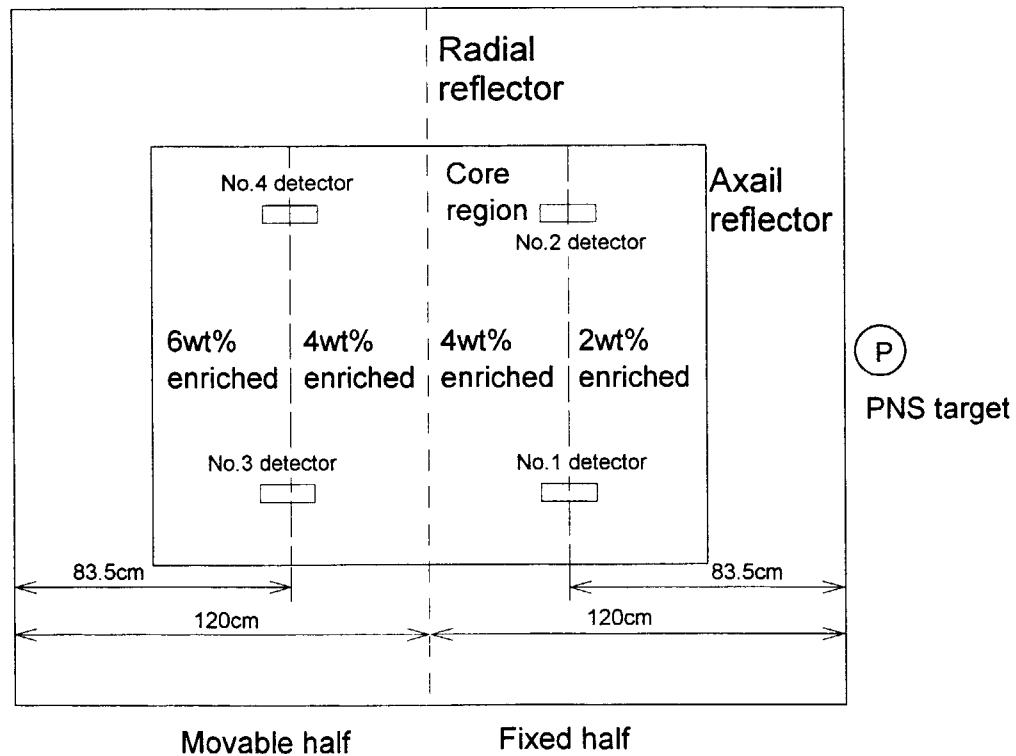
第2.2.2図 移動側の燃料棒及びBP棒の構造図



第 2.2.3 図 検出器及びパルス中性子源のプロック線図

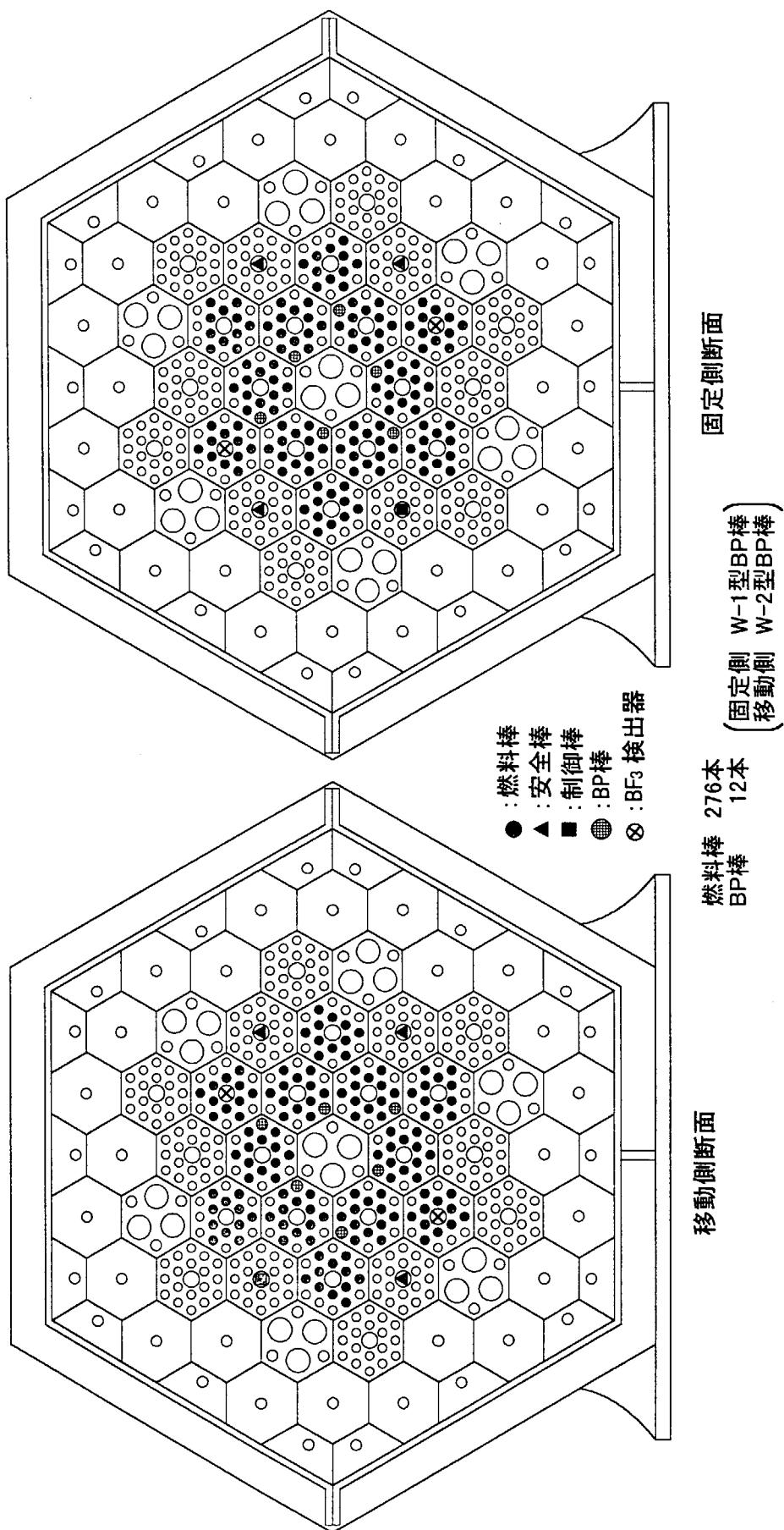


(a) 固定側燃料装荷図

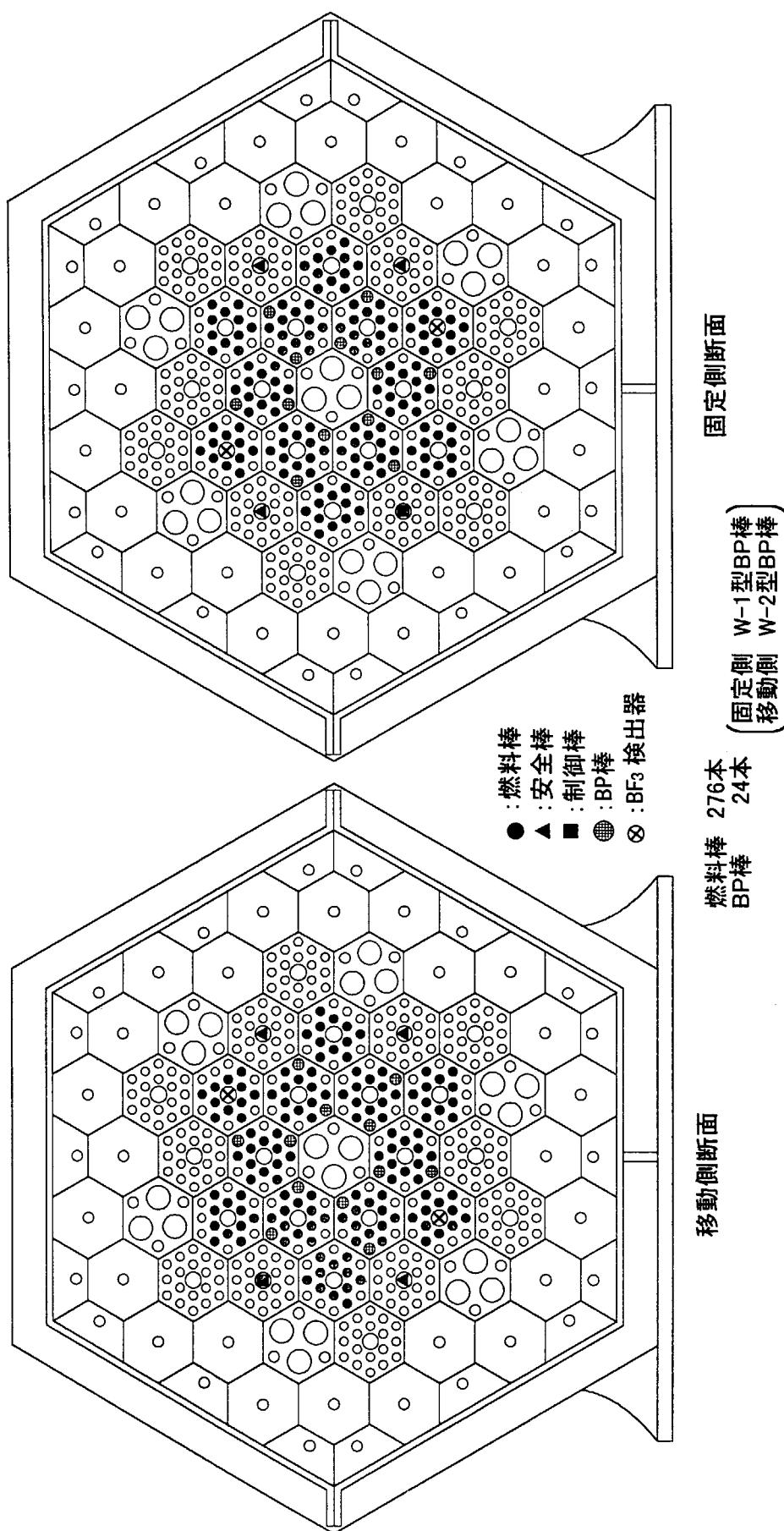


(b) 軸方向燃料濃縮度配置

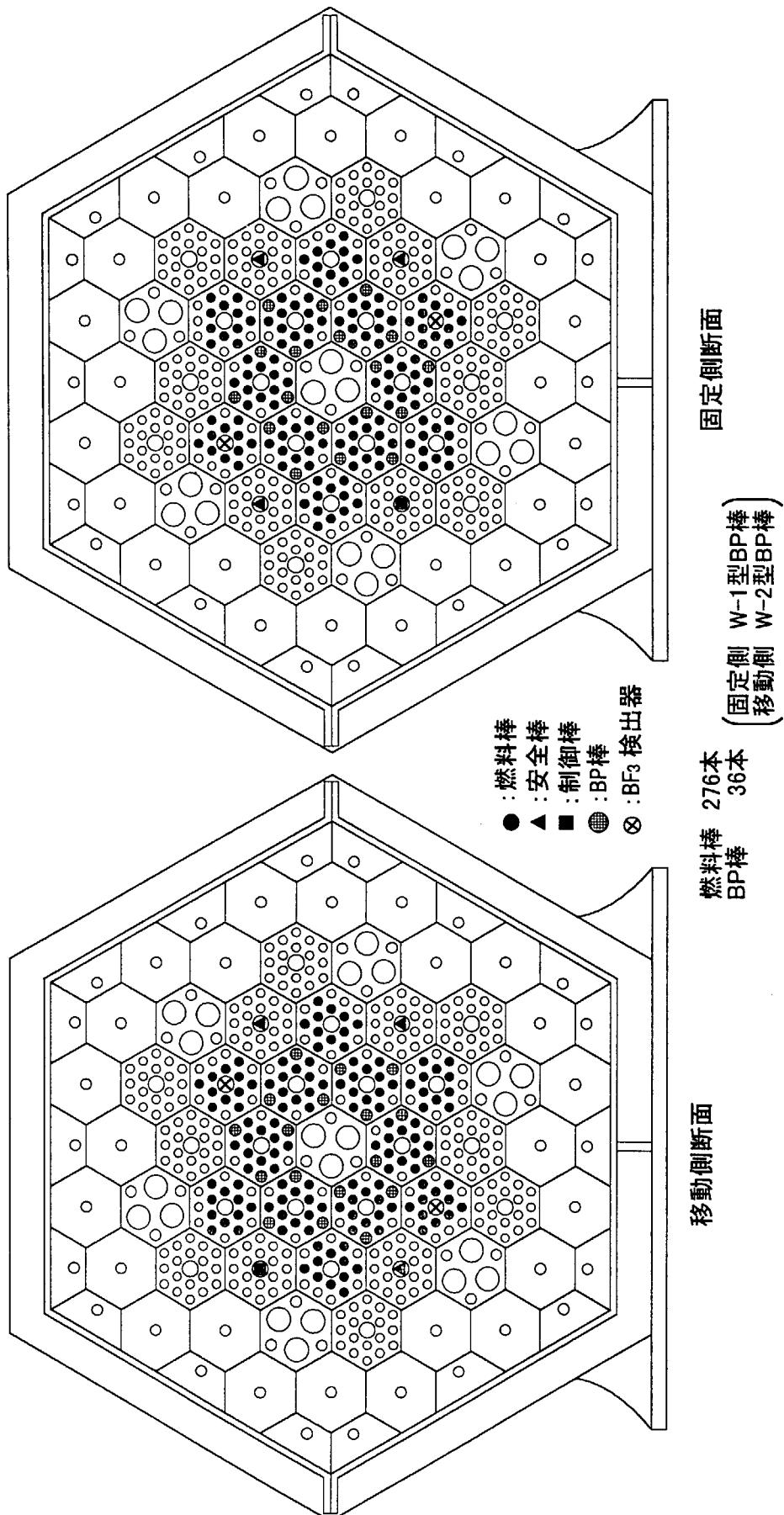
第2.2.4図 VHTRC-4炉心基準体系と検出器配置(燃料棒276本)



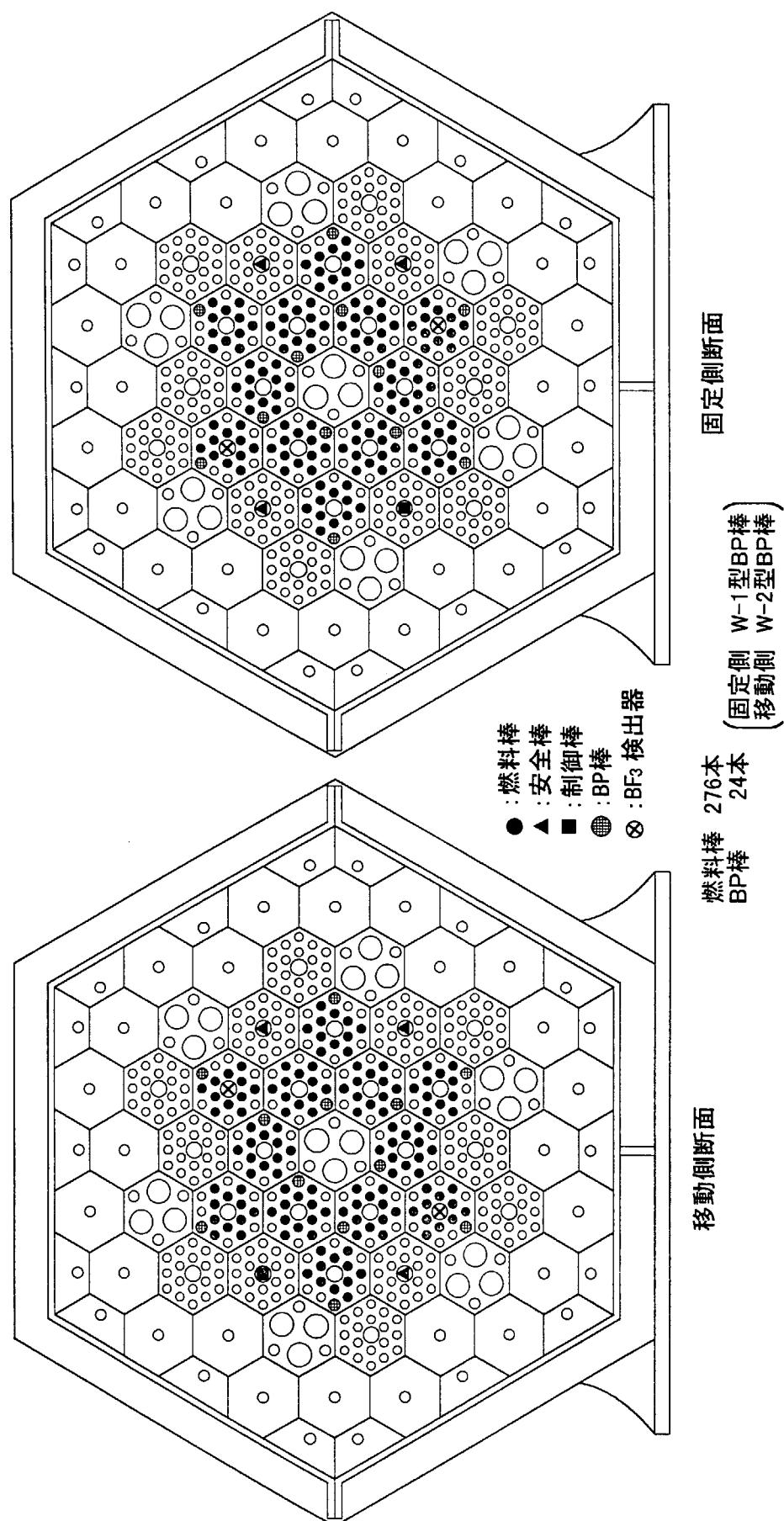
第2.2.5図 VHTRC-4 炉心装荷図(ケース1、BP12本装荷炉心)



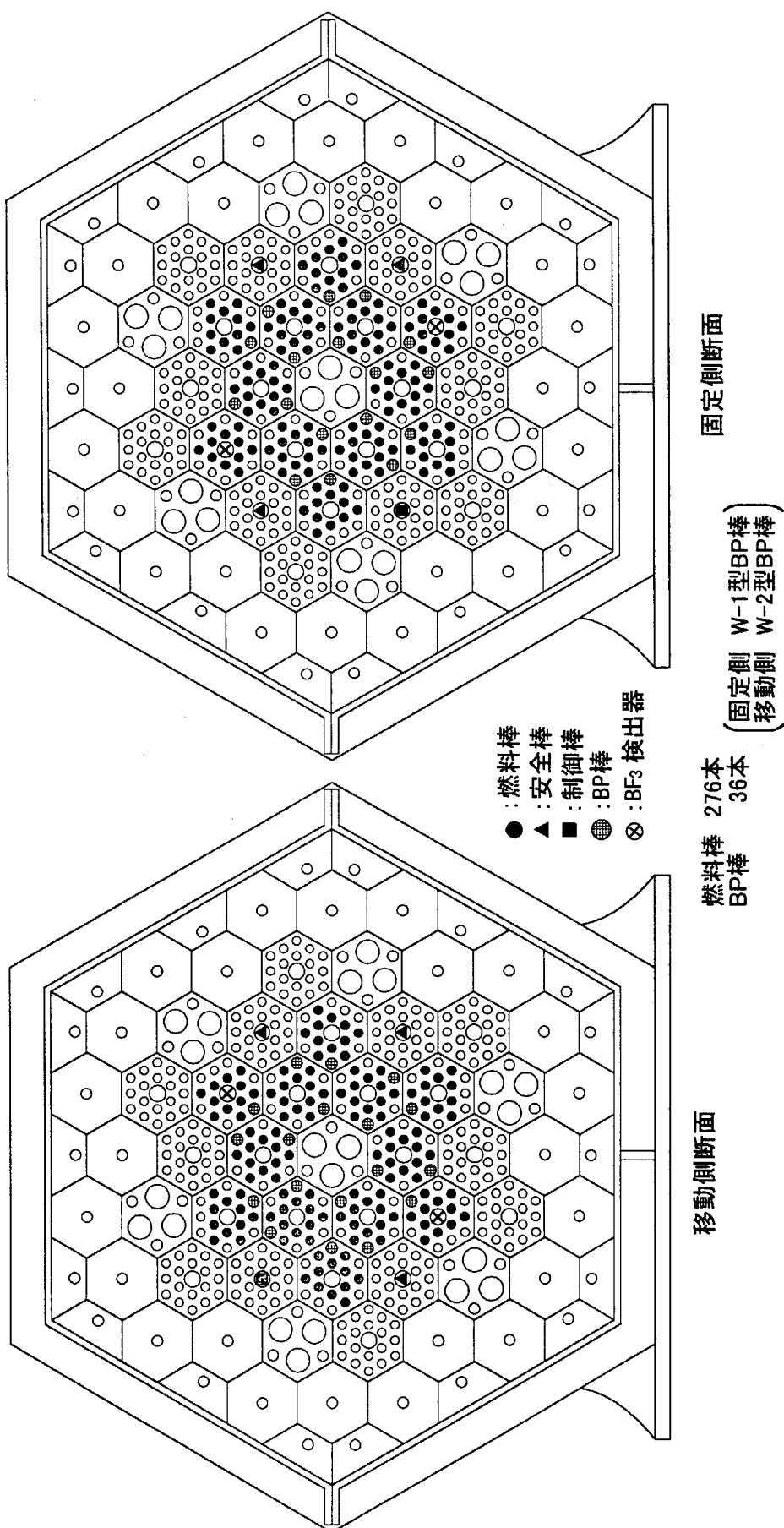
第2.2.6図 VHTRC-4 炉心装荷図(ケース2、BP24本装荷炉心)



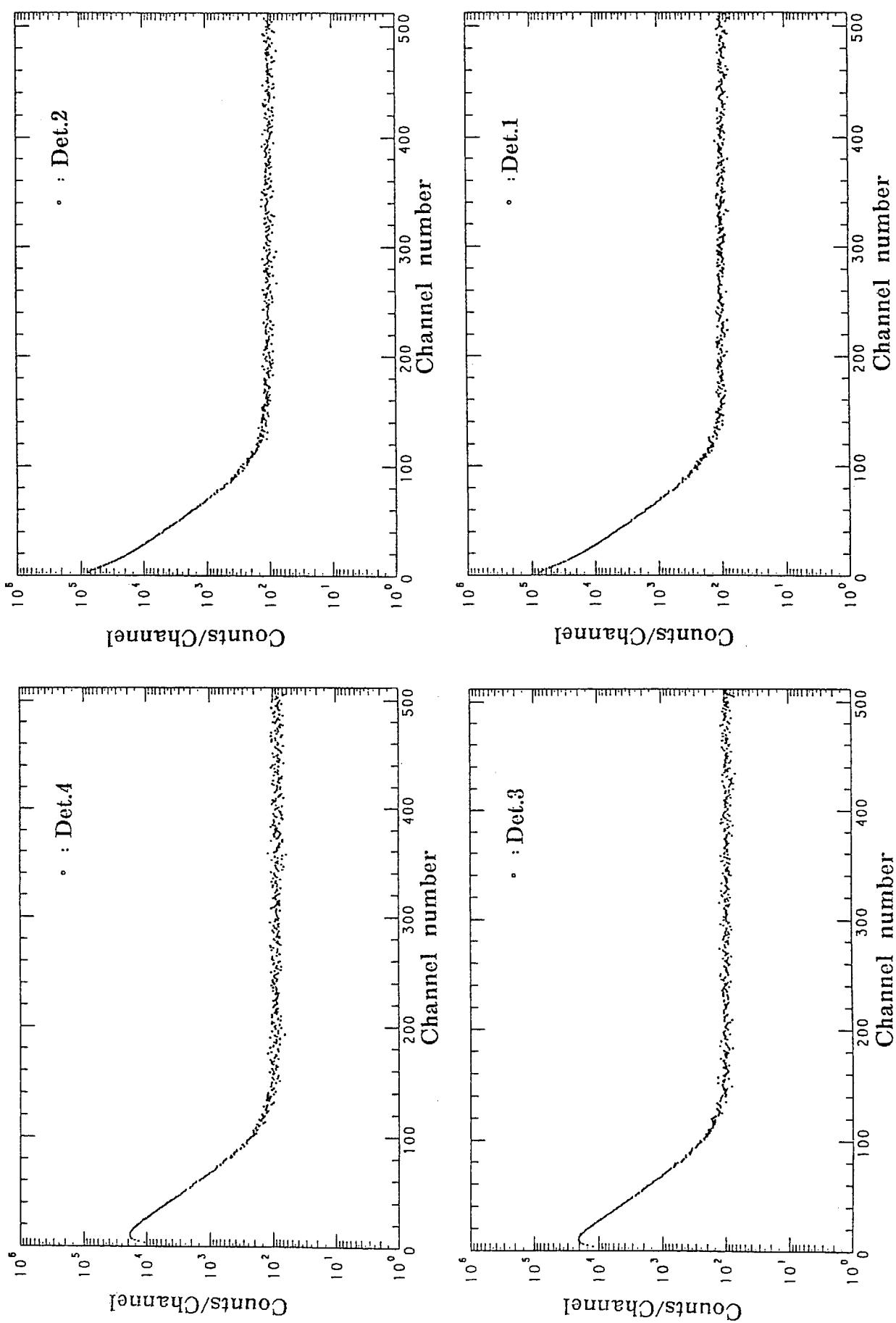
第2.2.7図 VHTRC-4 炉心装荷図(ケース3、BP36本装荷炉心)



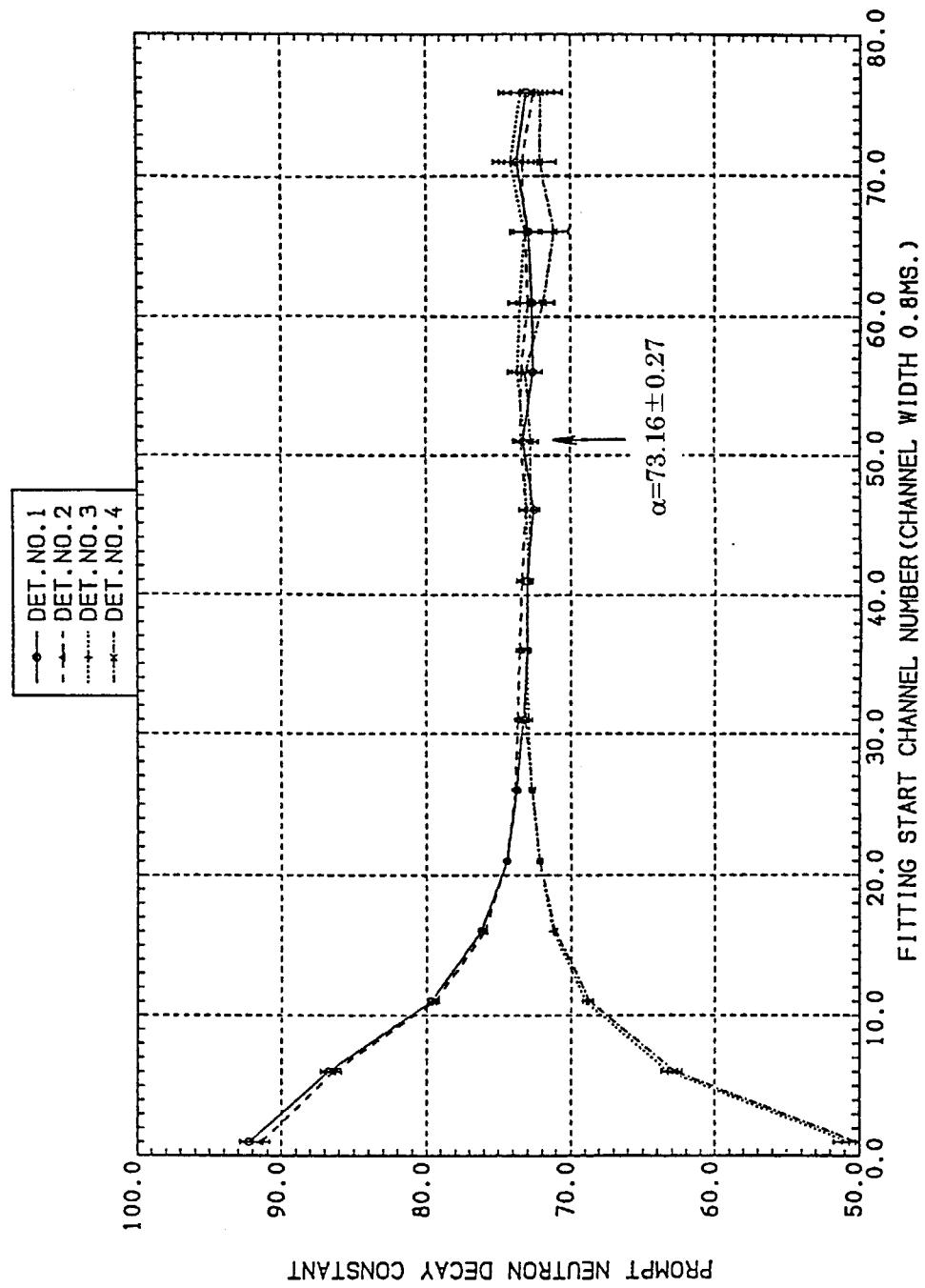
第2.2.8図 VHTRC-4 炉心装荷図(ケース4、BP24本装荷炉心)



第2.2.9図 VHTRC-4 炉心装荷図(ケース5、BP36本装荷炉心)



第2.2.10 図 PNS 法による即発中性子減衰曲線の測定結果 (実験ケース : 4)
(1 channel の時間幅 : 800μs)



第2.2.11図 即発中性子減衰定数 α と単一指数フィッティング開始チャンネルとの関係
(実験ケース: 4)

3. BP 反応度価値の解析評価

3. 1 計算コードシステムとモデル

計算コードは HTTR 核特性解析コードシステム⁷⁾により行った。このコードシステムは HTTR 核設計コードシステム⁸⁾と同等のものである。

燃料及び BP 格子計算には高温ガス炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-7 を用いる。炉心特性計算には拡散計算コード CITATION-1000VP を用いる。また、ここでは用いないが制御棒等の実効断面積作成には TWOTRAN-II コードを用いる。第 3.1.1 図にコードシステムの概要を示す。

解析に用いる計算モデルは、HTTR の設計に用いられた、1 つの燃料体を平面で 6 メッシュに分割するモデルを基本とした。このモデルを設計計算モデルと称する。また、比較のため、より細かなメッシュ分割のモデル（詳細計算モデル）の検討も実施した。このモデルは、BP の燃料体内の位置を表現できるように、1 つの燃料体を平面で 384 メッシュに分割したモデルである。以下にそれぞれのモデルについて述べる。また、それぞれのモデルで用いた原子数密度等のデータをまとめて付録に示す。

3. 1. 1 設計計算モデル

HTTR の設計に使用しているモデルと同様に、1 つの燃料体を平面で 6 メッシュに分割したモデルである。炉心計算は 3 次元 3 角メッシュの全炉心体系で行った。燃料等の物質はブロック単位で均質化している。

燃料のミクロ断面積セットは、BP を含めて 2wt%、4wt% 及び 6wt% の燃料のそれぞれについて燃料棒 1 本を単位格子とした燃料格子のスペクトルで、燃料本数、BP 濃度毎に作成した。反射体のミクロ断面積セットは微少の燃料を添加した黒鉛中のスペクトルで作成した。燃料セルのモデルを第 3.1.2 図に示す。燃料セルの外径は、燃料セルの断面積がブロックの断面積を燃料棒本数で割った面積と等しくなるように定めている。BP セルについても、BP セルの断面積がブロックの断面積を BP 本数で割った面積と等しくなるように定めている。

ミクロ断面積セットは、DELIGHT-7 コードにより 40 群（速 20 群、熱 20 群）で実効ミクロ断面積を求めた後、XEDIT コードで 6 群（速 3 群、熱 3 群）に縮約しミクロ型とした。速中性子群群構造を第 3.1.1 表に、熱中性子群群構造を第 3.1.2 表に示す。

炉心計算は、ブロック毎の原子数密度とミクロ断面積セットを用い、ブロック内の物質を均質化したブロック均質モデルで実施した。軸方向のメッシュ分割図を第 3.1.3 図に、径方向のメッシュ分割図を第 3.1.4 図に示す。燃料ブロックは、燃料棒 12 本及び 11 本を正六角形領域内に均質化している。BP についても同様に正六角領域内に均質化している。

3. 1. 2 詳細計算モデル

このモデルは1燃料体を平面で384メッシュに分割し、燃料棒、BPを6メッシュの正六角形でモデル化し、この正六角形の内部で均質化した3次元全炉心体系のモデルである。実際の燃料棒及びBP棒の位置とモデルの対応を第3.1.5図に示す。位置、寸法ともによく表現されていることがわかる。このように設計計算モデルと比較してBP棒のブロック内での位置、ひいては炉心内でのBP棒の位置をより詳細にモデル化しているため、炉心内のインポータンス分布の効果をより詳細にモデル化できる。

各単位領域には、均質化した6群のミクロ断面積セットを使用している。解析に用いたミクロ断面積セットは燃料棒、黒鉛ブロック領域については6メッシュモデルと同じミクロ断面積セットを使用することとした。

詳細計算モデルではBP棒の領域はメッシュ6個分の狭い範囲となっている。拡散計算ではメッシュの中で中性子束を平均化することにより中性子束の離散化を行っているため、解析に用いる実効断面積もこの平均化した中性子束に対応するよう定めることが求められる。そのため、BP棒の周辺ではBPによる中性子吸収のため中性子束分布は大きく減少する。そこで、BP領域の¹⁰Bについては、6/384ブロック領域の寸法でBP周辺に設計計算モデルと同じ組成の燃料を巻いた6/384ブロック格子モデルにより実効断面積を評価した。この方法は、中性子束が大きく変化するBP棒周辺で断面積を均質化することとなる。また、比較のため、6メッシュモデルと同様のBP格子平均の実効断面積セットと無限希釈断面積によるBP用実効断面積セットも別途作成し、その効果を検討した。6/384ブロック格子モデルの図も併せて第3.1.2図に示す。

反射体黒鉛ブロックの断面積セットは設計計算モデルと同様のものを用いたが、燃料領域内のブロックや燃料棒領域内の黒鉛については燃料領域のミクロ断面積セットを使用した。それぞれDELIGHT-7コードにより40群（速20群、熱20群）で実効ミクロ断面積を求めた後、XEDITコードで6群（速3群、熱3群）に縮約しミクロ型とした。エネルギー群構造は、設計計算モデルと同じものである。

全炉心計算用の軸方向のメッシュ分割図を第3.1.6図に示す。径方向のメッシュ分割図は省略するが、燃料ブロックの分割図は第3.1.5図に示したものであり、全燃料体について同様な分割である。

3. 2 解析結果と検討

3. 2. 1 設計計算モデルによる解析結果

設計計算モデルによる解析結果を第3.2.1表に示す。BP反応度は、ケース0として解析を行ったBPを装荷していない炉心と、BPを装荷した炉心の実効増倍率の解析結果との差から評価した。

設計計算モデルによる解析結果は、実験結果に比べて反応度がいずれも10～25%の過小

評価となった。次に、それぞれのケースについてみてみると、ケース 1～3 のように比較的 BP が集まって配置され、本数が変化する場合は BP 本数の増加に伴って評価精度が向上しており、ケース 1、4 及び 5 のように分散して BP を装荷する場合は、BP 配置が炉心内のある部分に偏っていることと、内側の BP が装荷された領域に対する外側燃料領域の大きさの影響があるため、BP 本数の増加に対して一定の傾向ではない。

これらの結果により、ブロック内の BP 本数が多いほど、ブロック内での BP の影響が強いためブロック均質モデルによる表現に適しており精度は向上する傾向であるが、体系内の BP の炉心内での偏りが強い場合には、ブロック均質モデルではブロック内の BP の局所的影響を表現できないため、評価誤差が大きくなっている。これは、ブロックを均質化しているため、炉心内のインポータンス分布による BP 反応度価値の位置効果を正確に表現できないためであると考えられる。

特にケース 3 と 5 は、BP 棒の本数は同じであるが、ブロック均質モデルでは、BP の装荷カラムの数が 6 と 12 と全く異なる体系となってしまい、評価誤差に約 10% の違いが生じている。このことからも BP 位置の影響が指摘される。この場合には、ブロック内の BP 位置を表現できるモデルが必要であるといえる。

3. 2. 2 詳細計算モデルによる解析結果

詳細計算モデルでは、燃料棒及び BP を 6 つのメッシュで表すことにより燃料体内でのそれぞれの位置を表すことができる。燃料棒及び黒鉛ブロックには、設計計算モデルと同じミクロ断面積セットを用いている。第 3.2.2 表の結果は、BP 棒の ^{10}B について設計計算モデルと同様に BP 格子平均実効断面積を用いた結果である。第 3.2.3 表は BP 棒の ^{10}B について無限希釈の断面積を用いた結果である。第 3.2.4 表は、第 3.1.2 図に示すように、6/384 ブロック格子モデルによる実効断面積セットを用いている。反射体黒鉛ブロックのミクロ断面積セットはいずれの場合も設計計算モデルと同じく、微少の燃料を添加した黒鉛中のスペクトルを作成したものである。

BP 棒中の ^{10}B に燃料格子で作成した実効断面積を使用した結果は、いずれも約 10～20% の過小評価である。無限希釈断面積を使用した結果は約 30～50% の過大評価であったが、6/384 ブロック格子モデルで作成した実効断面積を使用した場合は+0.3～-10% の範囲で実験値とよく一致している。この場合も BP の装荷本数が多くなるにつれ誤差が小さくなっている。HTTR の燃料体と同様に 1 燃料体に 2 本の BP を装荷したケース 2 及びケース 5 では、それぞれ-6% 及び-3% 程度の誤差となっている。

これらの結果は、設計計算手法の結果で述べたような BP 配置の効果を考えるほかに、BP 領域には中性子束分布のひずみを考慮した実効断面積を用いる必要があること、特に、炉心計算に用いるメッシュの大きさに対応した実効断面積の評価が必要であることを示すものと考えられる。

BP は中性子の吸収体であるため、BP の周りで中性子束は急激に低下する。また、BP

棒の表面で中性子の多くが吸収されるので BP 棒内部の中性子束は更に低下する。第 3.2.2 表に示す解析では、BP セルで均質化した実効断面積としている。この場合、BP による中性子束の低下は BP の周りだけであるのでセル平均の中性子束が大きくなる。BP で吸収される中性子数は BP 棒内部の中性子束と BP のマクロ断面積の積で求められる。セル平均で実効断面積を求めていたため、セル平均の中性子束が大きくなると BP の吸収断面積は小さくなる。ここで、炉心計算においては、ブロックを細かく分割し、物質の配置を非均質としているので、BP 領域の平均中性子束は BP 領域の 6 つのメッシュで平均した中性子束になる。この値はセル平均の中性子束と異なるため、BP で吸収される中性子数を正確に評価することはできない。

これに対し、無限希釈の断面積を用いた第 3.2.3 表の結果では、35%~50% 程度過大評価となっている。無限希釈の断面積を用いるということは、BP 棒内部の中性子束の落ち込みを考慮していない吸収断面積を用いることになる。この断面積は中性子束分布が平坦な場合に対応する断面積である。実際には BP 内部で中性子束分布の大きな落ち込みがあるため、空間的な遮蔽効果によって実効断面積は無限希釈の断面積より小さくなる。このため、無限希釈の断面積を用いた解析では、実際より大きな吸収断面積を用いることとなり、BP による中性子の吸収を過大評価することになる。

6/384 ブロック格子モデルによる計算では、CITATION のメッシュの大きさに対応した BP セルで均質化した実効断面積を求めていくことになるため、他の 2 つの方法と比較して解析精度が向上していると言える。

ここで、設計に用いている DELIGHT-7、XEDIT コードによる実効断面積作成では、格子平均の実効断面積か無限希釈の断面積のいずれかの作成に限定されるため、BP 領域のように強吸收体を含む非均質モデル用に正確な実効断面積を求めることが困難である。そのためここでは 3 種類の近似手法を用いたが、BP 周辺に直接燃料が接すること、セルの外径が小さく実際の中性子束分布と必ずしも一致しないという近似はあるものの、6/384 ブロック格子による計算で評価精度の改善が可能であることがわかった。特に、BP 量が多い場合には 5% 以下の誤差と非常によい精度を示している。このことから、本実験例のように体系寸法が小さく燃料領域内やブロック内での BP 配置に非均質性が強い場合には、BP 配置の表現と、その実効断面積の正確な評価が重要であることが確認された。

6/384 ブロック格子では燃料が直接 BP 棒に接していること、格子の寸法が小さいことから、格子内の中性子束分布が実際の BP 棒周りの中性子束分布と必ずしも同じでないという問題がある。これは、BP 棒の周りに黒鉛を配置し、その外側に燃料を置く 3 領域のセルとし、更に格子の外径を大きくして中性子束分布を実際の分布に近づけるようにすることが必要であると考えられる。そして均質化する領域を格子中心 6/384 ブロックの部分とすることにより解決できると考えられる。

ここで、DELIGHT コードではコードの制限から、上記のような格子モデルを作成することができない。そのため、より詳細な解析を行うためには別のコードで BP 格子の計算

を行う必要があるものと考える。

3. 3 HTTR 解析モデルの検討

上記の検討から、BP のモデル化においては、燃料体内の BP 棒の位置をモデル化すること及び BP の実効断面積の評価が重要であることが明らかとなった。ここで、HTTR の解析モデルについて見ると、設計に用いられたモデルでは燃料ブロック内の物質をすべてブロック内で均質化しており、BP 棒の位置を評価することはできない。この方法は BP 反応度を 20%程度過小評価することが明らかとなった。HTTR の設計では BP 反応度の評価誤差として 10%を考慮している²⁾。今回の解析結果から、設計計算モデルでは最大で約 23%の過小評価であることがわかった。HTTR では燃料体に 2 本の BP 棒を装荷しているので、この体系に近いケース 2 及びケース 5 についてみても -18%程度の誤差がある。

しかしながら、設計計算モデルはいずれも BP 反応度を過小評価している。このことは、過剰反応度を高めに評価することとなる。このため、HTTR の設計に用いていたモデルは、過剰反応度の評価の観点からは保守的な評価を与えており、安全上問題ないといえる。

臨界試験の解析、運転監視等、より正確な解析が求められる場合、設計計算モデルでは誤差が大きくなることは避けられない。そのため、HTTR の特性解析及び運転監視を目的として 24 メッシュモデルが開発されてきた⁷⁾。このモデルはブロックを平面で 24 メッシュに分割し、燃料体内の BP 棒の位置をモデル化できるようになっている。更に、BP の構造が BP ペレットと黒鉛ペレットからなるゼブラ型の特徴を考慮するため、TWOTRAN によって実効断面積を評価している。

VHTRC の解析結果から、燃料体内の BP の位置をモデル化することにより BP 反応度値の評価精度が向上することが明らかとなった。24 メッシュモデルでの BP 評価モデルは、BP の位置をモデル化することを目指したものであり、BP 反応度の評価精度を向上させるための改良方法として妥当なものであるといえる。このことは、24 メッシュモデルにおいて BP 反応度の評価誤差が低減されていることからも言える⁷⁾。

第 3.1.1 表 速中性子群 群構造

群			レサジー (下限)	エネルギー (下限、eV)	群			レサジー (下限)	エネルギー (下限、eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
1	1	1	0.25	7.79×10^6	3	35	8.75	1.59×10^3	
		2	0.50	6.07×10^6		36	9.00	1.23×10^3	
		3	0.75	4.72×10^6		37	9.25	961	
		4	1.00	3.68×10^6		38	9.50	748	
		5	1.25	2.87×10^6		39	9.75	583	
	2	6	1.50	2.23×10^6		40	10.00	454	
		7	1.75	1.74×10^6		41	10.25	354	
		8	2.00	1.35×10^6		42	10.50	275	
		9	2.25	1.05×10^6		43	10.75	215	
	3	10	2.50	8.21×10^5		44	11.00	167	
		11	2.75	6.39×10^5		45	11.25	130	
		12	3.00	4.98×10^5		46	11.50	101	
		13	3.25	3.88×10^5		47	11.75	78.9	
	4	14	3.50	3.02×10^5		48	12.00	61.4	
		15	3.75	2.35×10^5		49	12.25	47.9	
		16	4.00	1.83×10^5		50	12.50	37.3	
		17	4.25	1.43×10^5		51	12.75	29.0	
2	5	18	4.50	1.11×10^5		52	13.00	22.6	
		19	4.75	8.65×10^4		53	13.25	17.6	
		20	5.00	6.74×10^4		54	13.50	13.7	
		21	5.25	5.25×10^4		55	13.75	10.68	
	6	22	5.50	4.09×10^4		56	14.00	8.32	
		23	5.75	3.18×10^4		57	14.25	6.48	
		24	6.00	2.48×10^4		58	14.50	5.04	
		25	6.25	1.93×10^4		59	14.75	3.93	
	7	26	6.50	1.50×10^4		60	15.00	3.06	
		27	6.75	1.17×10^4		61	15.25	2.38	
		28	7.00	9.12×10^3		62	15.50	1.86	
		29	7.25	7.10×10^3		63	15.75	1.44	
	8	30	7.50	5.53×10^3		64	16.00	1.125	
		31	7.75	4.31×10^3		65	16.25	0.876	
		32	8.00	3.36×10^3		66	16.50	0.683	
		33	8.25	2.61×10^3		67	16.75	0.532	
	9	34	8.50	2.04×10^3		68	17.00	0.414	

* 1 群の上限エネルギーは 10^7 eV である。

1)縮約群

2)少數群

3)多群

第 3.1.2 表 热中性子群 群構造

群			エネルギー (上限、eV)	幅(eV)	群			エネルギー (上限、eV)	幅(eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
6	40	1	0.002	0.002	4	28	26	0.55	0.1
		2	0.004	0.002			27	0.65	0.1
	39	3	0.006	0.002		27	28	0.75	0.1
		4	0.008	0.002			29	0.85	0.1
	38	5	0.015	0.007		26	30	0.95	0.1
		6	0.025	0.01			31	0.99	0.04
	37	7	0.035	0.01		25	32	1.01	0.02
		8	0.045	0.01			33	1.03	0.02
	36	9	0.055	0.01		24	34	1.045	0.015
		10	0.065	0.01			35	1.055	0.01
	35	11	0.075	0.01		23	36	1.065	0.01
		12	0.085	0.01			37	1.08	0.015
	34	13	0.105	0.02		22	38	1.10	0.02
		14	0.135	0.03			39	1.16	0.06
5	34	15	0.165	0.03		23	40	1.24	0.08
		16	0.195	0.03			41	1.35	0.11
	33	17	0.225	0.03		22	42	1.45	0.1
		18	0.255	0.03			43	1.55	0.1
	32	19	0.285	0.03		21	44	1.65	0.1
		20	0.295	0.01			45	1.75	0.1
	31	21	0.305	0.01		21	46	1.85	0.1
		22	0.335	0.03			47	1.95	0.1
	30	23	0.35	0.015		21	48	2.05	0.1
		24	0.39	0.04			49	2.15	0.1
	29	25	0.45	0.06			50	2.38	0.23

1)縮約群

2)少數群

3)多群

第3.2.1表 複数本のBPを装荷した炉心の設計計算モデルによる解析結果

ケース番号	BP配置		BP本数	実効増倍率	BP反応度(%Δk/k)		誤差(%) C/E-1
	内側カラム	外側カラム			解析値(C)	実験値(E)	
0	0	0	0	1.009825	-	-	-
1	1×6カラム	0	12	0.957150	5.45	7.06	-23.4
2	2×6カラム	0	24	0.908683	11.02	13.37	-17.6
3	3×6カラム	0	36	0.865809	16.47	18.28	-9.91
4	1×6カラム	1×6カラム	24	0.925533	9.02	10.30	-12.4
5	2×6カラム	1×6カラム	36	0.878339	14.82	17.74	-16.5

第3.2.2表 複数本のBPを装荷した炉心の詳細計算モデルによる解析結果
(BPにBP格子平均の断面積セットを用いた解析)

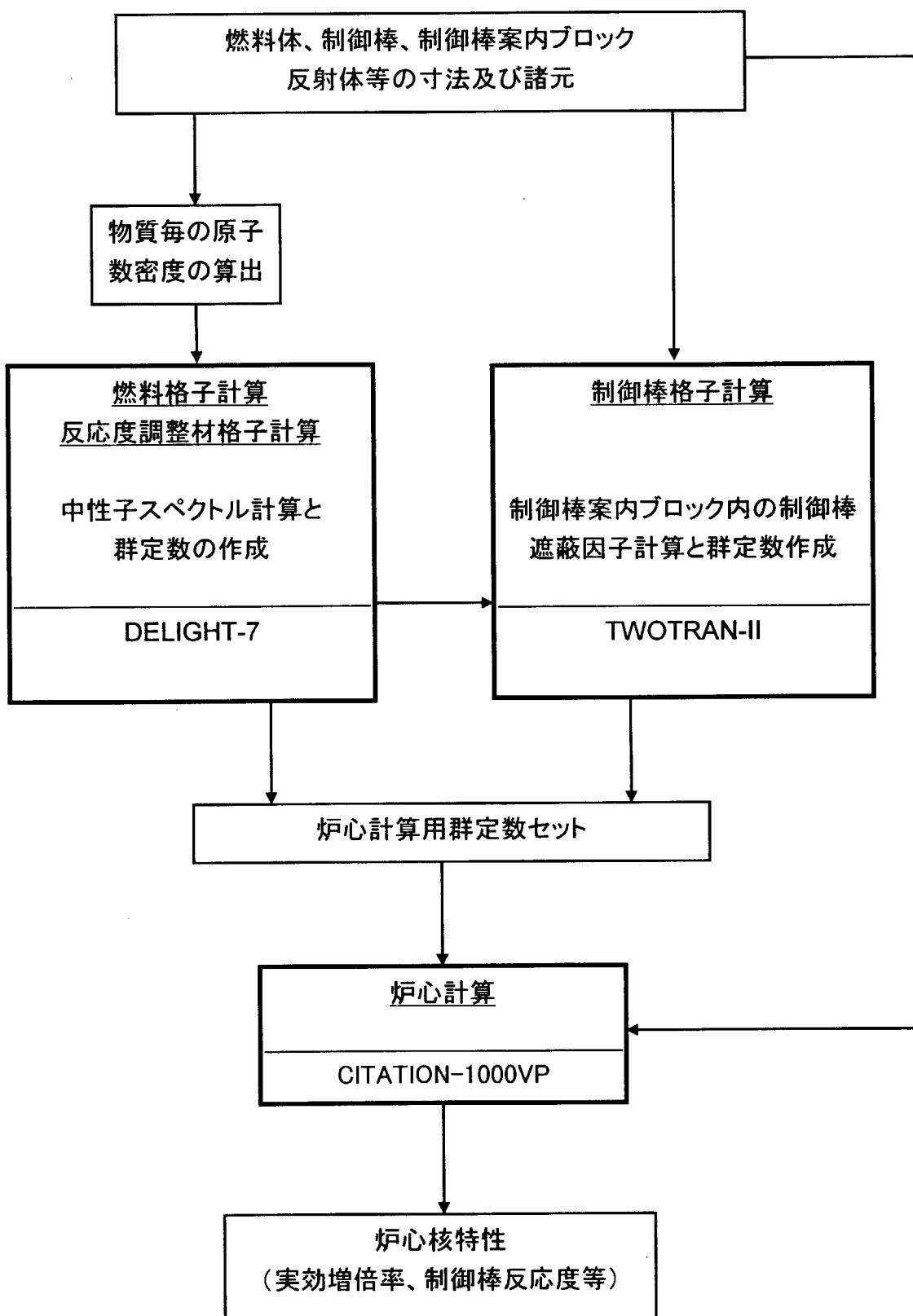
ケース番号	BP配置		BP本数	実効増倍率	BP反応度(%Δk/k)		誤差(%) C/E-1
	内側カラム	外側カラム			解析値(C)	実験値(E)	
0	0	0	0	0.998917	-	-	-
1	1×6カラム	0	12	0.945698	5.63	7.06	-20.3
2	2×6カラム	0	24	0.899866	11.02	13.37	-17.6
3	3×6カラム	0	36	0.858005	16.44	18.28	-10.1
4	1×6カラム	1×6カラム	24	0.925930	7.89	10.30	-23.4
5	2×6カラム	1×6カラム	36	0.864239	15.60	17.74	-12.1

第3.2.3表 構数本のBPを装荷した炉心の詳細計算モデルによる解析結果
(BPに無限希釈断面積を用いた解析)

ケース番号	BP配置		BP本数	実効増倍率	BP反応度(%Δk/k)		誤差 (%) C/E-1
	内側カラム	外側カラム			解析値(C)	実験値(E)	
0	0	0	0	0.998917	-	-	-
1	1×6カラム	0	12	0.910503	9.72	7.06	37.7
2	2×6カラム	0	24	0.839643	18.99	13.37	42.0
3	3×6カラム	0	36	0.780520	28.01	18.28	53.2
4	1×6カラム	1×6カラム	24	0.876833	13.94	10.30	35.3
5	2×6カラム	1×6カラム	36	0.786196	27.09	17.74	52.7

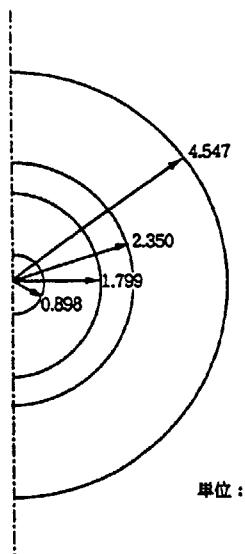
第3.2.4表 構数本のBPを装荷した炉心の詳細計算モデルによる解析結果
(BPに6/384 ブロック相当の実効断面積を用いた解析)

ケース番号	BP配置		BP本数	実効増倍率	BP反応度(%Δk/k)		誤差 (%) C/E-1
	内側カラム	外側カラム			解析値(C)	実験値(E)	
0	0	0	0	0.998917	-	-	-
1	1×6カラム	0	12	0.938542	6.44	7.06	-8.8
2	2×6カラム	0	24	0.888138	12.49	13.37	-6.6
3	3×6カラム	0	36	0.843402	18.46	18.28	1.0
4	1×6カラム	1×6カラム	24	0.915887	9.08	10.30	-11.8
5	2×6カラム	1×6カラム	36	0.849157	17.66	17.74	-0.5

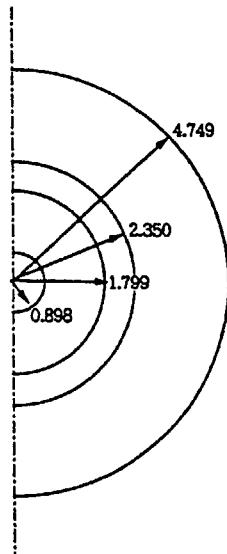


第 3.1.1 図 核特性評価コードシステムの概要

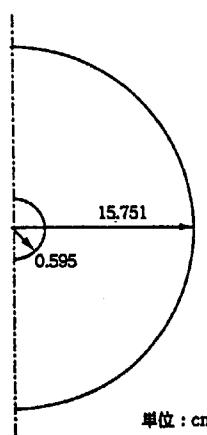
B - 4 燃 料



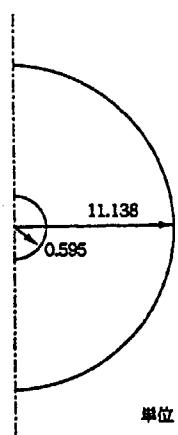
単位 : cm



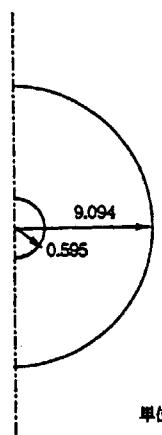
単位 : cm



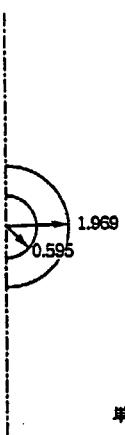
ブロック平均実効断面積
計算用 BP 格子モデル
(BP1 本 / ブロック)



ブロック平均実効断面積
計算用 BP 格子モデル
(BP2 本 / ブロック)

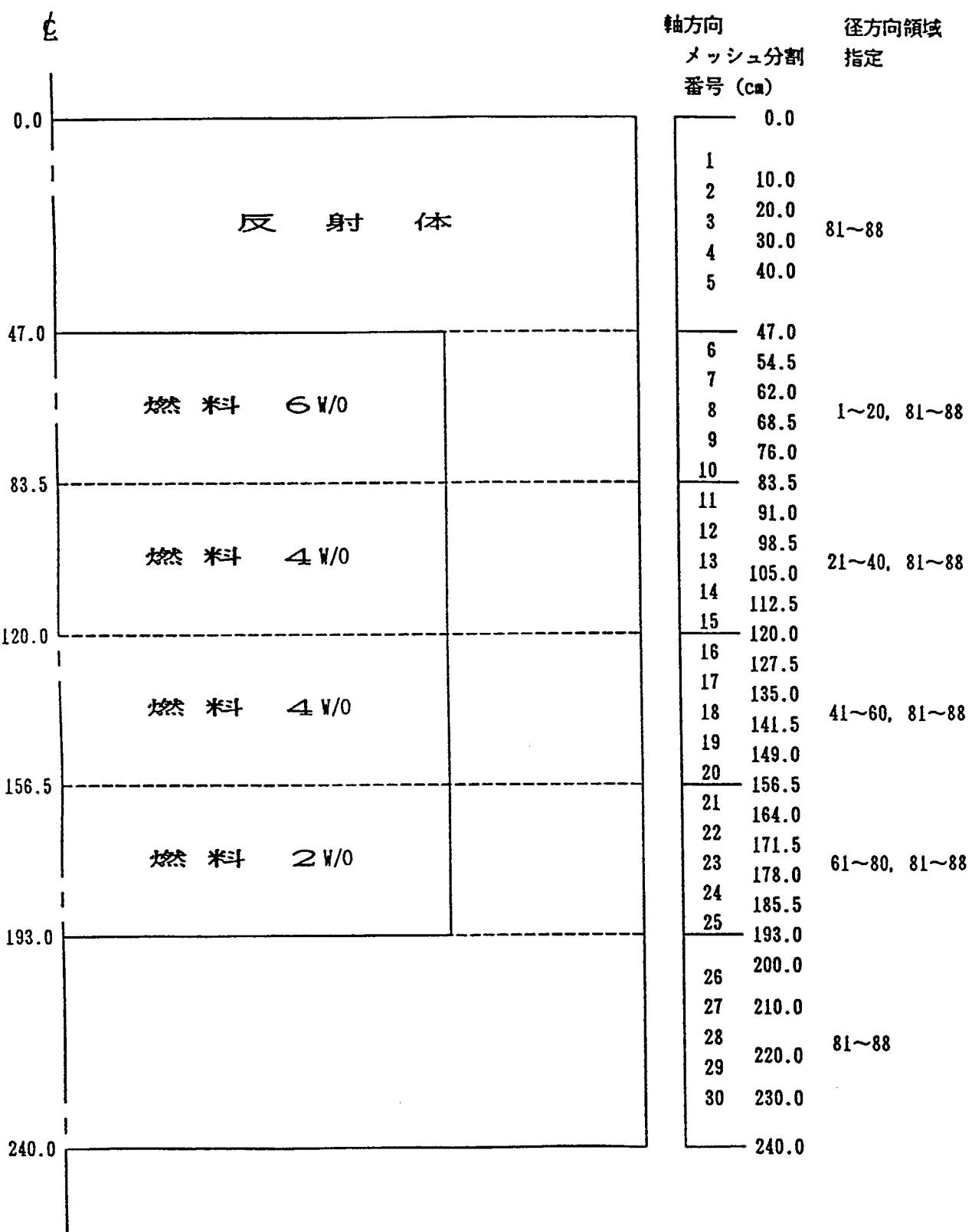


ブロック平均実効断面積
計算用 BP 格子モデル
(BP3 本 / ブロック)

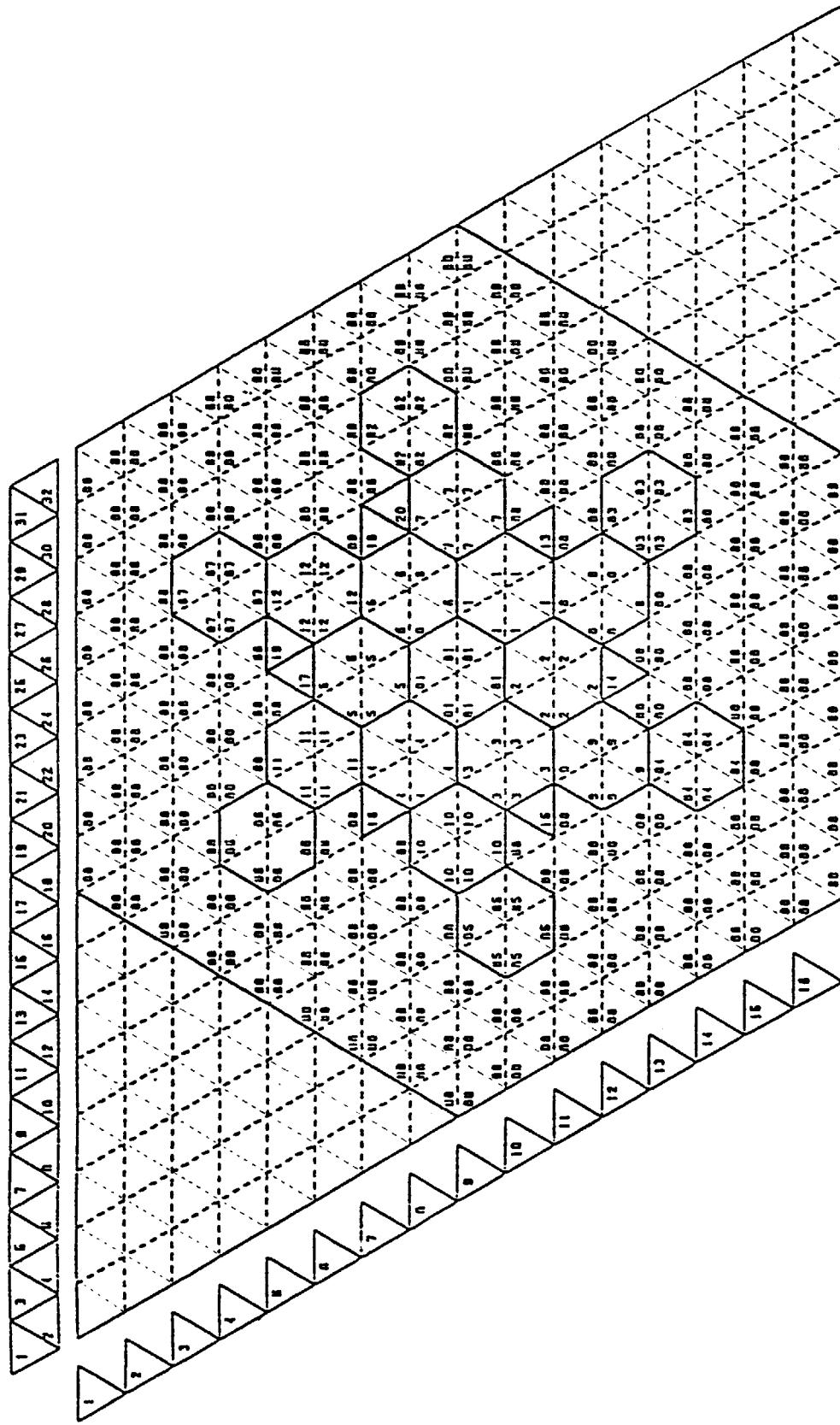


6/384 メッシュ領域平均
実効断面積計算用 BP 格子
モデル

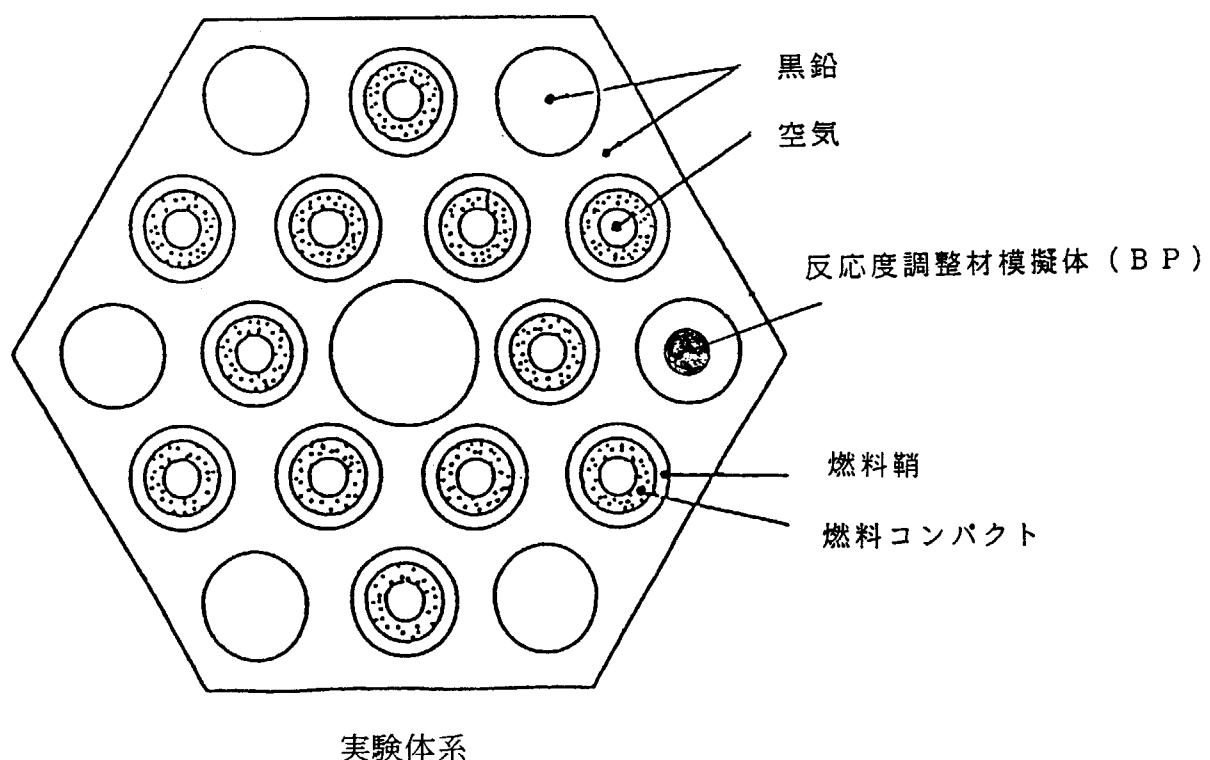
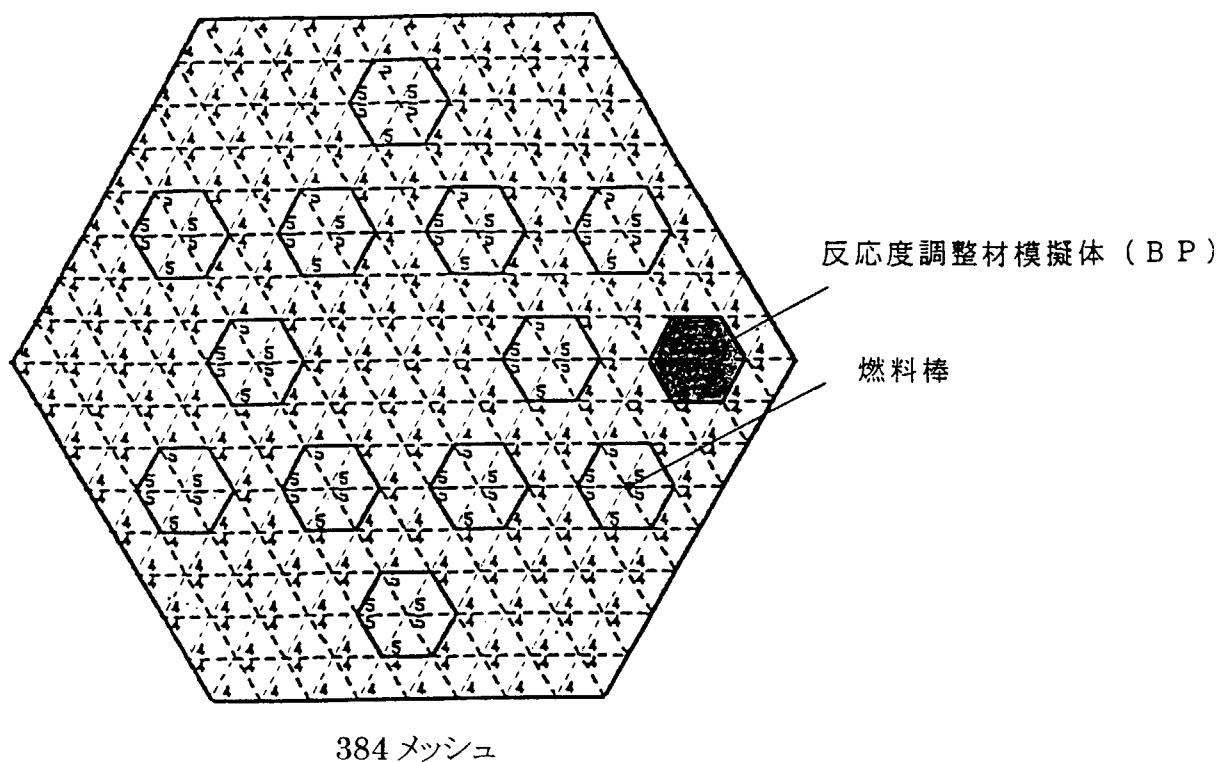
第 3.1.2 図 DELIGHT 用各種格子計算モデル



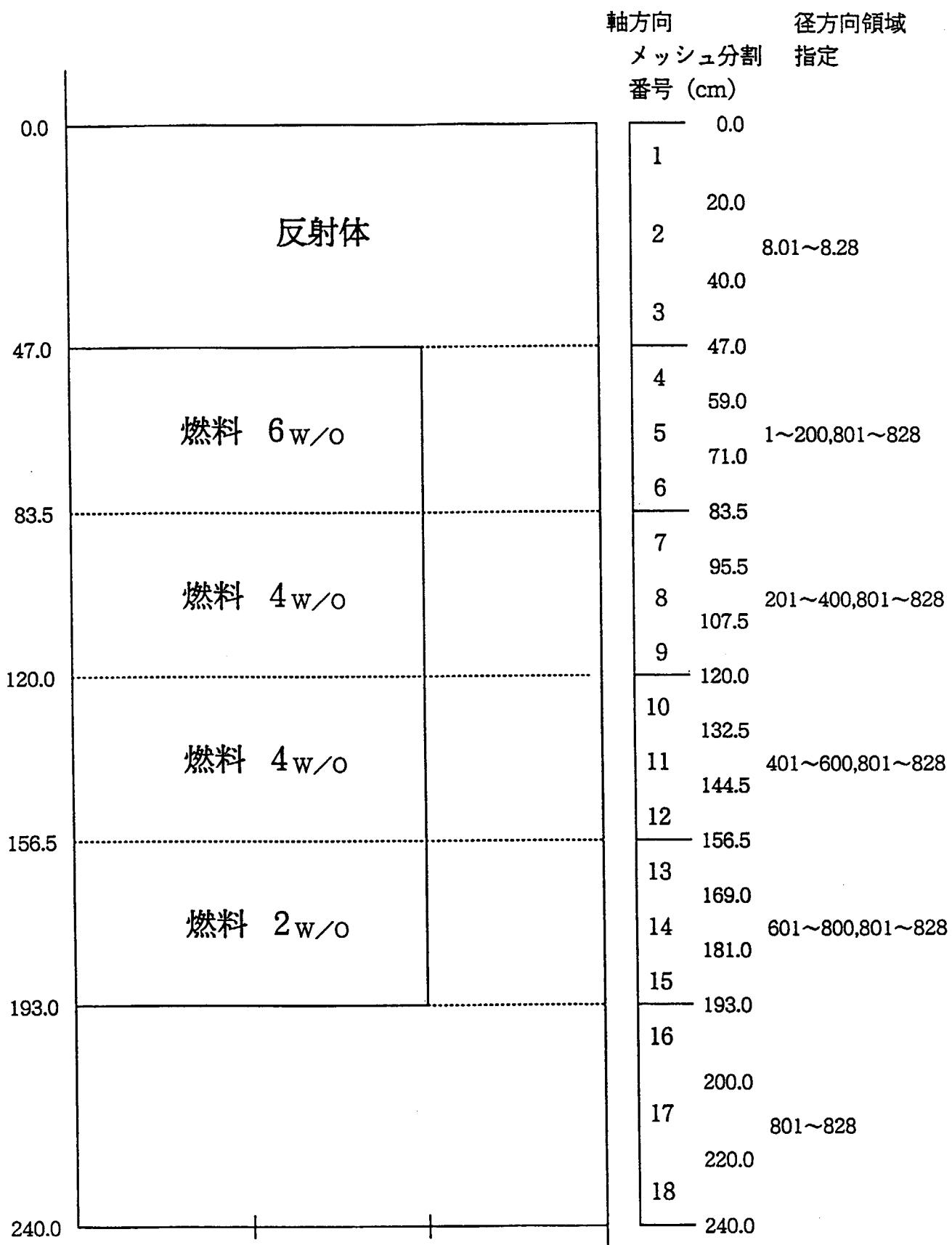
第 3.1.3 図 設計計算モデルでの全炉心軸方向メッシュ分割図



第 3.1.4 図 設計計算モデルでの全炉心径方向メッシュ分割図



第 3.1.5 図 詳細計算モデルでのブロック内メッシュ分割と燃料・BP 位置の比較



第 3.1.6 図 詳細計算モデルでの全炉心軸方向メッシュ分割図

4.まとめ

VHTRC で行われた複数本の BP を装荷した炉心の解析を行い、HTTR 核特性解析コードシステムを用いて BP 反応度の評価精度について検討した。その結果、HTTR の核設計に用いた手法では、複数本の BP を装荷した炉心での BP 反応度を約 20%過小評価することがわかった。また、解析結果はすべて過小評価であるため、過剰反応度評価において、HTTR の核設計手法は過剰反応度を大きく見積もることとなり保守的な結果を与えることが確認できた。

高温ガス炉の炉心設計の合理化、将来炉の設計、HTTR の各種試験解析及び運転管理等には、より正確な解析手法が求められる。HTTR の設計に用いた設計計算モデルの解析結果から、炉心内のインポータンス分布による影響を詳細に考慮できるよう、BP の燃料体内での位置をモデル化すれば解析精度の向上が図れると考えられた。そこで、燃料体内での BP 棒の位置をモデル化するため、ブロックを平面で 384 メッシュに分割した詳細計算モデルを作成し解析を行った。

その結果、燃料体内での BP の位置を考慮することと併せて、炉心計算に用いる BP 棒のメッシュの領域で均質化した実効断面積を用いることで、BP 反応度の評価誤差を約 10% 以下にすることができた。

以上から、HTTR の解析でも、燃料体内の BP 位置をモデル化すること及び BP に割り当てられたメッシュの大きさに対応した実効断面積を用いることによって解析精度の向上が図れることがわかった。今後、BP の実効断面積を評価するモデルについて、HTTR に適用する場合の検討を進めより一層の精度向上を図り、高温ガス炉の炉心設計の合理化、将来炉の設計、運転管理を目的とした解析手法の開発を進めることしたい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、VHTRC での実験を行う上でご協力いただいた VHTRC 関係者一同に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Saito S. et al., "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI-1332(1994).
- 2) 山下 清信、他、「VHTRC の実験データに基づく高温工学試験研究炉の核設計計算手法の精度検討」、JAERI-M 88-245(1988).
- 3) 安田 秀志、他、「VHTRC（高温ガス炉臨界実験装置）の建設」、JAERI-1305(1986).
- 4) Akino, F., et al.,: J. Nucl. Sci. Technol, 17,593(1980).
- 5) 奥村 啓介、他「SRAC95 ; 汎用核計算コードシステム」、JAERI-Data/Code 96-015(1996).
- 6) Kaneko, Y., et al. : Nucl. Sci. Eng., 50,173(1973).
- 7) 藤本 望、他、「高温工学試験研究炉(HTTR)臨界試験の予備解析結果-HTTR 核特性解析コードシステムに基づく解析-」、JAERI-Tech 98-021(1998).
- 8) Yamashita K., et al., : "Nuclear Design of the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", Nucl. Sci. Eng. 122, 212-228(1998).

付録 設計計算モデル及び詳細計算モデルでの入力データ集

設計計算モデル及び詳細計算モデルで用いた原子数密度等の入力データについて示す。

BP 棒を構成する各単体物質の原子数密度を付表 1 に、ブロック平均値を求める前段階としてこれら各単体物質を BP 挿入孔体積で平均した原子数密度を付表 2 に示す。DELIGHT による格子計算に使用した、燃料棒、ブロック黒鉛、ギャップ用の空気を付表 3～4 に示す。なおブロック黒鉛中の空孔の空気は、ブロック黒鉛原子数密度に含めてある。また、DELIGHT の格子計算に使用した BP 棒のデータを付表 5 に示す。

設計計算モデルの拡散計算用原子数密度を付表 6～10 に示す。表中の混合比は、付表 2, 4 からこれらの値を作成する場合の混合体積割合である。

詳細計算モデルの拡散計算の原子数密度評価に用いる混合体積比を付表 11～12 に示す。また、原子数密度を付表 13 に示す。

以上をまとめたライブラリーデータについて付表 14 に示す。

付表1 BPを構成する単体物質の原子数密度

核種	ID	BPベレット (W-1型)	BPベレット (W-2型)	黒鉛ベレット (W-L型)	黒鉛ベレット (W-S型)	黒鉛さや (W-W型)	空気	備考
²³⁴ U	4							
²³⁵ U	5							
²³⁶ U	6							
²³⁸ U	8							
¹⁰ B	28	1.8602E-4	3.6858E-4					
¹¹ B	29	7.4874E-4	1.4836E-3					
C	30	8.5898E-2	8.6075E-2	8.3731E-2	8.3230E-2	8.3051E-2		
O	31			8.9652E-6	8.9284E-6	8.9152E-6	1.1088E-5	
S ₁	33							
N	49			1.0455E-5	1.0455E-5	1.0455E-5	4.1044E-5	
H	50			1.2400E-5	1.2327E-5	1.2300E-5	4.6798E-7	
¹⁰ B	99			1.2958E-9	1.2880E-9	1.2853E-9		
¹¹ B	100			5.2159E-9	5.1847E-9	5.1735E-9		
備考		密度 1.73g/cm ³	B含有量 0.97wt% 不純物・空 氣無視	密度 1.73g/cm ³	不純 物・空 孔率 は、加 ロック 黒鉛 と同 じす る。	密度 1.66g /cm ³	密度 1.66g /cm ³ (重量 3174.3g) 不 純物・空孔 率は、加 ロック黒 鉛と同 じす る。	

付表2 BP挿入孔体積で平均した原子数密度(プロック平均値評価用)

核種	ID	W-1型 BP挿入	W-2型 BP挿入	黒鉛ペレット及 びさや*	備考	
²³⁴ U	4					
²³⁵ U	5					
²³⁶ U	6					
²³⁸ U	8					
¹⁰ B	28	1.1763E-5	2.3177E-5			
¹¹ B	29	4.7348E-5	9.3294E-5			
C	30	8.1937E-2	8.1918E-2	7.9405E-2		
O	31	8.3854E-6	8.3892E-6	9.0146E-6		
S ₁	33					
N	49	1.0270E-5	1.0285E-5	1.1813E-5		
H	50	1.1338E-5	1.1338E-5	1.1781E-5		
¹⁰ B	99			1.2280E-9		
¹¹ B	100			4.9428E-9		
相 對 比	B P プロック 空氣	0.06323 0.92119 0.01558	0.06288 0.92119 0.01593	WL 0.05851 WS 0.00068 WW 0.89642 空氣 長さ 73cm 長さ 73cm 長さ 73cm 長さ 73cm	0.04439	

*1 ネジふた部は、WWと同じ材質、長さ36mmとする。シース上端肩の切欠き部は、最外端のため無視する。

付表 3 DELIGHT 用領域別原子数密度（長さ補正のない値、ミクロ計算用）

(10²⁴/cm³)

核種	ID	空気 (キャップ部)	反射体、プロ ック黒鉛	燃料棒 (6% PF=0.2975		燃料棒 (4% PF=0.2957		燃料棒 (2% PF=0.2989	
				コンパクト [*]	シース+空気	コンパクト [*]	シース+空気	コンパクト [*]	シース+空気
²³⁴ U	4			9.4429-7		6.2952-7		2.6785-7	
²³⁵ U	5			1.1658-4		7.8111-5		3.9511-5	
²³⁶ U	6			7.3502-7		4.9001-7		3.1475-7	
²³⁸ U	8			1.8034-3		1.8498-3		1.9113-3	
¹⁰ B	28			1.3893-9		1.3015-9		1.3035-9	
¹¹ B	29			5.1159-9		5.1982-8		4.8001-9	
¹² C	30			8.3534-2		7.6715-2		7.8377-2	
O	31	1.1088-5		8.9468-6		3.8693-3		3.8693-3	
N	49	4.1044-5		1.0455-5		1.2389-5		1.2343-5	
H	50	4.6798-7		1.2364-5		2.2293-5		1.1630-5	
Si	33			1.6860-3				2.2438-5	
(使用寸法)				コンパクト内半径(cm)	0.900	0.898	0.898		
				" 外半径(cm)	1.798	1.799	1.793		
				シース内半径(cm)	(1.825)	シース補正係数	(1.825)	シース補正係数	
				" 外半径(cm)	(2.340)	0.93679	(2.340)	0.93827	(2.340) 0.92951
				燃料孔半径(cm)	2.350	2.350	2.350	2.350	2.350
				格子半径(cm)	4.5470(12ビン) / 4.7491(11ビン)				

- 空気の組成は 11°C 相当で評価。
- シースはプロック黒鉛と同じとし、内外ボイド部を含む（端栓部は含まず）。
- * 1 燃料粒子充填率と粒子以外の部分の原子数密度でこの値に調整した。

付表4 DELIGHT用領域別原子数密度(長さ72/73補正後の値、マクロ計算用)

(10²⁴/cm³)

核種	ID	空気	反射体、プロ ック黒鉛	燃料棒 (6%) PF=0.2934		燃料棒 (4%) PF=0.2916		燃料棒 (2%) PF=0.2948	
				コンパクト*	シース+空気	コンパクト*	シース+空気	コンパクト*	シース+空気
²³⁴ U	4			9.3135-7		6.2090-7		2.6418-7	
²³⁵ U	5			1.1498-4		7.7041-5		3.8970-5	
²³⁶ U	6			7.2495-7		4.8330-7		3.1044-7	
²³⁸ U	8			1.7894-3		1.8245-3		1.8851-3	
¹⁰ B	28			1.2658-8		1.2658-8		1.2788-8	
¹¹ B	29			1.3893-9		1.3292-9		1.3313-9	
¹² C	30			5.1159-9		5.1270-8		4.9022-9	
O	31			8.3534-2		7.5664-2		7.7171-2	
N	49			8.9468-6		9.0395-6		9.0362-6	
H	50			1.1088-5		1.1779-5		1.1733-5	
Si	33			1.0455-5		2.1988-5		2.1988-5	
				1.2364-5		1.1849-5		1.1867-5	
				1.6941-3				2.2131-5	
(使用寸法)		コンパクト内半径(cm)		0.900		0.898		0.898	
"		外半径(cm)		1.798		1.799		1.793	
シース内半径(cm)			(1.825)	シース補正係数	(1.825)	シース補正係数	(1.825)	シース補正係数	(1.825)
" 外半径(cm)			(2.340)	0.95672	(2.340)	0.95823	(2.340)	0.94928	(2.340)
燃料孔半径(cm)			2.350		2.350		2.350		2.350
格子半径(cm)			4.5470(12ビン) / 4.7491(11ビン)		4.5470(12ビン) / 4.7491(11ビン)		4.5470(12ビン) / 4.7491(11ビン)		4.5470(12ビン) / 4.7491(11ビン)

・空気の組成は11°C相当で評価。

・シースはプロック黒鉛と同じとし、内外ボイド部および端栓部を含める。

* 1 燃料粒子充填率と粒子以外の部分の原子数密度でこの値に調整した。

付表 5 設計計算モデルの DELIGHT 格子計算用 BP 関係データ

(1) 格子寸法^{*1}

① BP半径 = 0.595cm(W-1, W-2)

② BP体積比

1本用 0.001427

2本用 0.002854

3本用 0.004281

(3) 格子半径

1本用 15.7511cm

2本用 11.1377cm

3本用 9.0939cm

(2) BP原子数密度

① W-1 ($\rho = 1.73\text{g/cc}$)

$N(^{10}\text{B}) = 1.8602 \times 10^{-4}$

$N(^{11}\text{B}) = 7.4874 \times 10^{-4}$

$N(^{12}\text{C}) = 8.5898 \times 10^{-2}$

② W-2 ($\rho = 1.75\text{g/cc}$)

$N(^{10}\text{B}) = 3.6858 \times 10^{-4}$

$N(^{11}\text{B}) = 1.4836 \times 10^{-3}$

$N(^{12}\text{C}) = 8.6075 \times 10^{-2}$

* 1 ミクロ定数準備用のため軸方向補正なし

付表 6 設計計算モデルの CITATION 用ブロック平均原子数密度
(T-6型燃料、BP2wt%)

核種	ID	12- γ			11- γ			備考
		N0-BP	W2-3本	W2-2本	W2-1本	N0-BP	W2-1本	
²³⁴ U	4	1.0914E-7	1.0914E-7	1.0914E-7	1.0914E-7	1.0005E-7	1.0005E-7	
²³⁵ U	5	1.3474E-5	1.3474E-5	1.3474E-5	1.3474E-5	1.2352E-5	1.2352E-5	
²³⁸ U	6	8.4954E-8	8.4954E-8	8.4954E-8	8.4954E-8	7.7875E-8	7.7875E-8	
²³⁸ U	8	2.0970E-4	2.0970E-4	2.0970E-4	2.0970E-4	1.9223E-4	1.9223E-4	
¹⁰ B	28	—	1.5478E-6	1.0319E-6	5.1595E-7	—	5.1594E-7	
¹¹ B	29	—	6.2305E-6	4.1537E-6	2.0768E-6	—	2.0769E-6	
C	30	7.8938E-2	7.8830E-2	7.8866E-2	7.8902E-2	7.9321E-2	7.9285E-2	
O	31	4.5522E-4	4.5519E-4	4.5520E-4	4.5521E-4	4.1804E-4	4.1803E-4	
S	33	1.9852E-4	1.9852E-4	1.9852E-4	1.9852E-4	1.8198E-4	1.8198E-4	
N	49	1.0641E-5	1.0630E-5	1.0633E-5	1.0637E-5	1.0625E-5	1.0621E-5	
H	50	1.2969E-5	1.2900E-5	1.2923E-5	1.2946E-5	1.2919E-5	1.2896E-5	
¹⁰ B	99	2.6488E-9	2.4719E-9	2.5309E-9	2.5898E-9	2.5438E-9	2.4872E-9	
¹¹ B	100	1.0300E-8	9.6122E-9	9.8414E-9	1.0071E-8	9.8676E-9	9.6479E-9	
混合比	燃料	0.111558	0.111558	0.111558	0.111558	0.10595	0.10595	
	ブロック	0.83884	0.77206	0.79432	0.81658	0.85227	0.83001	
	空気	0.04558	0.04558	0.04558	0.04558	0.04178	0.04178	
	B P	0.0	0.06678	0.04452	0.02226	0.0	0.02226	

・軸長 72/73 準正済

付表 7 設計計算モデルの CITATION 用ブロック平均原子数密度
(B-4 型燃料、BP2wt%)

核種	ID	12-ビン			11-ビン			備考
		N0-BP	W2-3本	W2-2本	W2-1本	N0-BP	W2-1本	
²³⁴ U	4	7.2974E-8	7.2974E-8	7.2974E-8	7.2974E-8	6.6899E-8	6.6899E-8	
²³⁵ U	5	9.0546E-6	9.0546E-6	9.0546E-6	9.0546E-6	8.3009E-6	8.3009E-6	
²³⁶ U	6	5.6802E-8	5.6802E-8	5.6802E-8	5.6802E-8	5.2073E-8	5.2073E-8	
²³⁸ U	8	2.1443E-4	2.1443E-4	2.1443E-4	2.1443E-4	1.9658E-4	1.9658E-4	
¹⁰ B	28	—	1.5478E-6	1.0319E-6	5.1595E-7	—	5.1594E-7	
¹¹ B	29	—	6.2305E-6	4.1536E-6	2.0768E-6	—	2.0768E-6	
C	30	7.9142E-2	7.8830E-2	7.8866E-2	7.8902E-2	7.9508E-2	7.9285E-2	
O	31	4.5654E-4	4.5650E-4	4.5652E-4	4.5653E-4	4.1928E-4	4.1927E-4	
S	33	—	—	—	—	—	—	
N	49	1.0633E-5	1.0622E-5	1.0622E-5	1.0629E-5	1.0619E-5	1.0615E-5	
H	50	1.2977E-5	1.2908E-5	1.2931E-5	1.2954E-5	1.2926E-5	1.2903E-5	
¹⁰ B	99	2.6531E-9	2.4759E-9	2.5350E-9	2.5940E-9	2.5479E-9	2.4912E-9	
¹¹ B	100	1.0317E-8	9.6280E-9	9.8577E-9	1.0087E-8	9.8843E-9	9.6643E-9	
混合比	燃料 ガロッ 空気 B P	0.11592	0.11592	0.11592	0.11592	0.10627	0.10627	シースを含む 燃料、ブロック間

・軸長72/73 準正済

付表 8 設計計算モデルの CITATION 用ブロック平均原子数密度
(B-4 型燃料、BP1wt%)

核種	ID	12-ビン			11-ビン		備考
		NO-BP	W1-3本	W1-2本	W1-1本	NO-BP	
²³⁴ U	4	7.2974E-8	7.2974E-8	7.2974E-8	7.2974E-8	6.6899E-8	6.6899E-8
²³⁵ U	5	9.0546E-6	9.0546E-6	9.0546E-6	9.0546E-6	8.3009E-6	8.3009E-6
²³⁶ U	6	5.6802E-8	5.6802E-8	5.6802E-8	5.6802E-8	5.2073E-8	5.2073E-8
²³⁸ U	8	2.1443E-4	2.1443E-4	2.1443E-4	2.1443E-4	1.9658E-4	1.9658E-4
¹⁰ B	28	—	7.8561E-7	5.2375E-7	2.6188E-7	—	2.6198E-7
¹¹ B	29	—	3.1623E-6	2.1081E-6	1.0541E-6	—	1.0545E-6
C	30	7.9142E-2	7.9035E-2	7.9071E-2	7.9106E-2	7.9508E-2	7.9106E-2
O	31	4.5654E-4	4.5650E-4	4.5652E-4	4.5653E-4	4.1928E-4	4.1927E-4
S ₁	33	—	—	—	—	—	—
N	49	1.0633E-5	1.0621E-5	1.0625E-5	1.0629E-5	1.0619E-5	1.0615E-5
H	50	1.2977E-5	1.2908E-5	1.2931E-5	1.2954E-5	1.2926E-5	1.2903E-5
¹⁰ B	99	2.6531E-9	2.4759E-9	2.5350E-9	2.5940E-9	2.5479E-9	2.4912E-9
¹¹ B	100	1.0317E-8	9.6280E-9	9.8577E-9	1.0087E-8	9.8843E-9	9.6643E-9
混合比	燃料	0.11592	0.11592	0.11592	0.11592	0.10627	0.10627
	ブロック	0.83884	0.77206	0.79432	0.81658	0.85227	0.83001
	空気	0.04540	0.04540	0.04540	0.04540	0.04162	0.04162
	B P	0.0	0.06678	0.04452	0.02226	0.0	0.02226

シースを含む
燃料、ブロック間

・軸長72/73 補正済

付表9 設計計算モデルの CITATION 用 プロック平均原子数密度
(B-2型燃料、BP1wt%)

核種	ID	12-ビン			11-ビン			備考
		NO-BP	W1-3本	W1-2本	W1-1本	NO-BP	W1-1本	
²³⁴ U	4	3.0773E-8	3.0773E-8	3.0773E-8	3.0773E-8	2.8210E-8	2.8210E-8	
²³⁵ U	5	4.5394E-6	4.5394E-6	4.5394E-6	4.5394E-6	4.1613E-6	4.1613E-6	
²³⁶ U	6	3.61620E-8	3.61620E-8	3.61620E-8	3.61620E-8	3.3149E-8	3.3149E-8	
²³⁸ U	8	2.1959E-4	2.1959E-4	2.1959E-4	2.1959E-4	2.0130E-4	2.0130E-4	
¹⁰ B	28	—	7.8561E-7	5.2374E-7	2.6187E-7	—	2.6198E-7	
¹¹ B	29	—	3.1623E-6	2.1081E-6	1.0541E-6	—	1.0545E-6	
C	30	7.9128E-2	7.9035E-2	7.9071E-2	7.9106E-2	7.9496E-2	7.9106E-2	
O	31	4.5764E-4	4.5760E-4	4.5762E-4	4.5763E-4	4.2027E-4	4.2026E-4	
S	33	—	—	—	—	—	—	
N	49	1.0669E-5	1.0657E-5	1.0661E-5	1.0665E-5	1.0651E-5	1.0647E-5	
H	50	1.2971E-5	1.2902E-5	1.2925E-5	1.2948E-5	1.2920E-5	1.2897E-5	
¹⁰ B	99	2.6551E-9	2.4778E-9	2.5369E-9	2.5960E-9	2.5496E-9	2.4928E-9	
¹¹ B	100	1.0325E-8	9.6355E-9	9.8653E-9	1.0095E-8	9.8913E-9	9.6711E-9	
混合比	燃料 ブロック 空気 B P	0.11489	0.11489	0.11489	0.11489	0.10532	0.10532	シースを含む 燃料、ブロック間

・軸長72/73補正済

付表 10 設計計算モデルの CITATION 用ブロック平均原子数密度
(反射体)

核種	ID	反射体					備考
²³⁴ U	4						
²³⁵ U	5						
²³⁶ U	6						
²³⁸ U	8						
¹⁰ B	28	---					
¹¹ B	29	---					
C	30	8.3534E-2					
O	31	8.9468E-6					
S ₁	33	---					
N	49	1.0455E-5					
H	50	1.2364E-5					
¹⁰ B	99	1.3893E-9					
¹¹ B	100	5.1159E-9					
混合比	燃料 ブロック 空気 B P	0.0 1.0 0.0 0.0					

付表 11 詳細計算モデル用混合体積比
(燃料用、長さ補正なし)

項目	T-6 燃料	B-4 燃料	B-2 燃料	備考
コンバクト 内半径 (cm)	0.900	0.898	0.898	
コンバクト 外半径 (cm)	1.798	1.799	1.793	
コンバクト 内側空気体積 (cm ³)	185.762	184.938	184.938	
コンバクト 体積 (cm ³)	555.637	557.289	552.347	
シースの一部体積 (cm ³)	147.638	146.810	151.752	*1
384 メッシュ領域 (cm ³)	889.037	889.037	889.037	R = 1.9689 cm
空気割合 (コンバクト内側)	0.2089	0.2080	0.2080	
コンバクト割合	0.6250	0.6269	0.6213	
シース割合	0.1661	0.1651	0.1707	

*1 シース両側のギャップは、端栓部とほぼ相殺するため無視する。

付表 12 詳細計算モデル用混合体積比
(BP用、長さ補正を含む)

項目	W-1 BP	W-2 BP	備考
BP 外半径 (cm)	0.595	0.595	
BP 長さ (cm)	72.000	71.600	
シース内半径 (cm)	0.6055	0.6055	
シース外半径 (cm)	2.3345	2.3345	
BP 体積 (cm ³)	80.079	79.634	
空気 体積 (cm ³)	2.851	2.835	
シース体積 (cm ³)	806.108	806.568	
384 メッシュ領域 (cm ³)	889.037	889.037	長さ 73 cm 相当
BP割合	0.09007	0.08957	長さ補正含む
BP、シース間ギャップ	0.00321	0.00319	
シース割合 (W-W)	0.90672	0.90724	

(軸長 72/73 準正済)

付表 13 詳細計算モデル用原子数密度 (軸長 72/73 準正済)

核種	ID	T-6 燃料	B-4 燃料	B-2 燃料	B P (W-1型)	B P (W-2型)	黒鉛ブロック領域
²³⁴ U	4	5.8209E-7	3.8924E-7	1.6414E-7	---	---	---
²³⁵ U	5	7.1863E-5	4.8297E-5	2.4212E-5	---	---	---
²³⁶ U	6	4.5309E-7	3.0298E-7	1.9288E-7	---	---	---
²³⁸ U	8	1.1184E-3	1.1438E-3	1.1712E-3	---	---	---
¹⁰ B	28	---	---	1.6756E-5	3.3022E-5	---	---
¹¹ B	29	---	---	6.7444E-5	1.3292E-4	---	---
C	30	6.0565E-2	6.1594E-2	6.1842E-2	8.3041E-2	8.3059E-2	8.3534E-2
O	31	2.3890E-3	2.3962E-3	2.4020E-3	8.1192E-6	8.1356E-6	8.8198E-6
S	33	1.0393E-3	---	---	---	---	---
N	49	1.0531E-5	1.0474E-5	1.0587E-5	9.6115E-6	9.6161E-6	1.0045E-5
H	50	1.5808E-5	1.5841E-5	1.5855E-5	1.1154E-5	1.2328E-5	1.2252E-5
¹⁰ B	99	8.1320E-9	8.1551E-9	8.1703E-9	---	---	1.3893E-9
¹¹ B	100	3.2857E-8	3.2951E-8	3.3012E-8	---	---	5.1159E-9
混合比	空気	0.2089	0.2080	0.2080	0.00321	0.00319	0.0
	コンバクト	0.6250	0.6269	0.6213	0.0	0.0	0.0
	シ-八	0.1661	0.1651	0.1707	0.90672	0.90724	1.0
	B P	0.0	0.0	0.0	0.09007	0.08959	0.0

付表 14 CITATION 用ミクロライブラリー

(1)、ファイル名 …… J7318.CLG06BPN.DATA

(2)、エネルギー群数 …… 6 群

$$E_u^1 = 1.0 \times 10^7 \text{ eV}$$

$$E_u^2 = 1.83 \times 10^5 \text{ eV}$$

$$E_u^3 = 9.61 \times 10^2 \text{ eV}$$

$$E_u^4 = 2.38 \text{ eV}$$

$$E_u^5 = 0.65 \text{ eV}$$

$$E_u^6 = 0.105 \text{ eV}$$

(3)、温度 …… 300 K

(4)、核種 …… 13 種

^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U 、 ^{10}B 、 ^{11}B 、C、O、Si、N、H、 ^{10}B （不純物）、 ^{11}B （不純物）

(5)、物質 …… 25 種

- 1、燃料 6%、12 ピン、BP なし (DB6P12BPN)
- 2、燃料 6%、12 ピン、W2-1 (DB6P12W21)
- 3、燃料 6%、12 ピン、W2-2 (DB6P12W22)
- 4、燃料 6%、11 ピン、BP なし (DB6P11BPN)
- 5、燃料 6%、11 ピン、W2-1 (DB6P11W21)
- 6、燃料 4%、12 ピン、BP なし (DB4P12BPN)
- 7、燃料 4%、12 ピン、W2-1 (DB4P12W21)
- 8、燃料 4%、12 ピン、W2-2 (DB4P12W22)
- 9、燃料 4%、12 ピン、W1-1 (DB4P12W11)
- 10、燃料 4%、12 ピン、W1-2 (DB4P12W12)
- 11、燃料 4%、11 ピン、BP なし (DB4P11BPN)
- 12、燃料 4%、11 ピン、W2-1 (DB4P11W21)
- 13、燃料 4%、11 ピン、W1-1 (DB4P11W11)
- 14、燃料 2%、12 ピン、BP なし (DB2P12BPN)
- 15、燃料 2%、12 ピン、W1-1 (DB2P12W11)
- 16、燃料 2%、12 ピン、W1-2 (DB2P12W12)
- 17、燃料 2%、11 ピン、BP なし (DB2P11BPN)
- 18、燃料 2%、11 ピン、W1-1 (DB2P11W11)
- 19、燃料 6%、12 ピン、W2-3 (DB6P12W23)
- 20、燃料 4%、12 ピン、W2-3 (DB4P12W23)
- 21、燃料 4%、12 ピン、W1-3 (DB4P12W13)
- 22、燃料 2%、12 ピン、W1-3 (DB2P12W13)
- 23、反射体ブロック (MIREFBLK)
- 24、BP (W-1、6/384格子平均) (MIBPAVW1)
- 25、BP (W-2、6/384格子平均) (MIBPAVW1)

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECE閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ³ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(-10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネ ル ギ ー ・ 仕 事 ・ 熱 量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J(計量法)	
								= 4.184J(熱化学)	= 4.1855J(15°C)
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸		
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹		
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ¹⁵		
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹		
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹		
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸		
	1.60218×10 ¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1		

放 射 能	Bq	Ci	吸 收 線 量	Gy	rad	照 射 線 量	C/kg	R	1 Sv= 100 rem	
									1	100
	1	2.70270×10 ⁻¹⁰		1	100		1	3876		
	3.7×10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58×10 ⁻¹	1		

(86年12月26日現在)

燃料体内の反応度調整材位置を考慮した反応度価値評価手法のLHT-RC実験データによる検討